



Ricardo Jorge Barão Ramos

(Licenciado em Engenharia Geológica)

Barragens em Betão Compactado com Cilindros (BCC) - Evolução e utilização em Portugal

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica (Geotecnia) pela Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Orientador: Professor Doutor Fernando F. S. Pinho (FCT/UNL)

Co-Orientador: Professor Doutor Pedro C. C. Lamas (FCT/UNL)

Júri

Presidente: Professora Doutora Ana Paula F. da Silva (FCT/UNL)

Arguente: Professora Doutora Maria Teresa T. G. Santana (FCT/UNL)

Vogais: Professor Doutor Fernando F. S. Pinho (FCT/UNL)

Professor Doutor Pedro C. C. Lamas (FCT/UNL)



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Setembro de 2011

Ricardo Jorge Barão Ramos

(Licenciado em Engenharia Geológica)

Barragens em Betão Compactado com Cilindros (BCC) - Evolução e utilização em Portugal

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica (Geotecnia) pela Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Orientador: Professor Doutor Fernando F. S. Pinho (FCT/UNL)

Co-Orientador: Professor Doutor Pedro C. C. Lamas (FCT/UNL)

Júri

Presidente: Professora Doutora Ana Paula F. da Silva (FCT/UNL)

Arguente: Professora Doutora Maria Teresa T. G. Santana (FCT/UNL)

Vogais: Professor Doutor Fernando F. S. Pinho (FCT/UNL)

Professor Doutor Pedro C. C. Lamas (FCT/UNL)

**Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa**

Setembro de 2011

Barragens em Betão Compactado com Cilindros (BCC)

- Evolução e utilização em Portugal

***Copyright* © Ricardo Jorge Barão Ramos**

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

O estudo que me propus fazer nesta dissertação não seria possível sem o apoio de todos aqueles que, de forma directa ou indirecta, deram o seu contributo para que tivesse sido dado este importante passo na minha formação académica.

Um especial agradecimento ao Professor Fernando Pinho do Departamento de Engenharia Civil (DEC/FCT) e Professor Pedro Lamas do Departamento de Ciências da Terra (DCT/FCT), cuja orientação, paciência, disponibilidade, motivação e ajuda foram essenciais no decorrer dos trabalhos realizados.

Quero agradecer também ao Eng^o. Vitor Vermelhudo e Eng^o. Pedro Gago, da empresa SECIL-Outão, pela paciência e disponibilidade no fornecimento do material necessário para a realização dos ensaios experimentais referidos nos anexos.

Outro especial agradecimento ao Eng^o. Cerqueira Bastos da empresa Edifer, o qual se disponibilizou no fornecimento de alguma documentação por forma melhor entender o trabalho a realizar.

Agradeço também à Professora Ana Paula Silva do DCT/FCT, pela documentação fornecida.

O meu muito obrigado à Professora Teresa Santana, do DEC/FCT, pela documentação fornecida, bem como pelo seu tempo disponibilizado no esclarecimento de dúvidas que me foram surgindo.

Não podia deixar de agradecer aos técnicos José Gaspar e Jorge Silvério, do DEC/FCT, pela sua disponibilidade e ajuda no decurso dos trabalhos experimentais.

Um agradecimento especial para a minha família, em especial aos meus pais pela paciência que tiveram, e também pela disponibilidade financeira fornecida no decorrer da minha formação académica, pois sem eles este trabalho não seria possível de realizar.

O meu muito obrigado aos “Primos Zéis” pelos bons momentos passados no decorrer da minha formação académica, e pelo apoio e força que me deram.

Por fim um agradecimento a todos os colegas de curso e amigos que me ajudaram e que dedicaram algum tempo quando precisei.

Aos meus pais.

RESUMO

A primeira e única barragem de betão compactado com cilindros (BCC) existente em Portugal foi construída em 2005 no Pedrógão. Actualmente encontra-se uma segunda barragem em construção e outras quatro em fase de projecto.

Na presente dissertação descreve-se os diferentes tipos de construção de barragens, para além das de betão compactado com cilindros (barragens de aterro e de betão convencional). É também descrita a evolução da utilização do BCC aplicado a este tipo de obras, com especial relevo para a barragem de Pedrógão.

São descritos também o método e os ensaios de granulometria, baridade e compactação para a realização de uma mistura de BCC aplicável em barragens, bem como os resultados obtidos.

Esta dissertação tem como objectivo principal a realização de uma campanha de ensaios laboratoriais usando uma máquina de corte de diaclases (também conhecida por máquina de Hoek) que, por razões de logística, não foi possível concretizar.

Nos anexos sintetiza-se o trabalho experimental realizado tendo em vista a utilização da referida máquina para ensaios de corte em provetes fabricados com uma mistura de BCC, assim como uma descrição da máquina de Hoek.

Palavras chave: barragens, BCC, ensaios laboratoriais, máquina de corte de diaclases

ABTRACT

The first and, for the moment, the only portuguese roller compacted concrete (RCC) dam was built in 2005 (Pedrógão). Nowadays, there is a second dam in construction and four other more are still in project.

In this work the different types of dams (embankment and conventional concrete ones), in addition to RCC dams, are explained. It is also described the evolution of the use of RCC applied to dams, with particular emphasis on the portuguese case.

The method and the necessary tests (particle size analysis, dry density and compression test with heavy Proctor) to perform a mixture of RCC applicable to dams are also described, such as the results obtained.

The final goal of this work was the making of a series of laboratory tests using the rock shear box apparatus, but for logistical reasons it was not possible to conclude.

The annexes of this work present a synthesis of the experimental work done and a description of the rock shear box apparatus.

Key words: Dams, RCC, laboratory tests, rock shear box apparatus

ABREVIATURAS

ACI	-	American Concrete Institute
ASTM	-	American Society of Testing and Materials
BCC	-	Betão Compactado com Cilindros
BCCEC	-	Betão Compactado com Cilindros Enriquecido com Calda
EDIA	-	Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A.
EDP	-	Eletricidade de Portugal
INAG	-	Instituto Nacional da Água
LNEC	-	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	-	Norma Portuguesa

SIMBOLOGIA

C	-	Compacidade
γ	-	Peso volúmico húmido
γ_s	-	Peso volúmico seco
d	-	Mínima dimensão do agregado
D	-	Máxima dimensão do agregado
e	-	Índice de vazios
m	-	Massa
Ph	-	Peso húmido da mistura
Ps	-	Peso seco da mistura
Pw	-	Peso da água
V	-	Volume
ω	-	Teor em água

Índice de Matérias

Agradecimentos	I
Resumo	III
Abstract	V
Abreviaturas	VII
Simbologia	VII
Índice das Matérias	IX
Índice de Figuras	XIII
Índice de Tabelas	XV

Capítulo I – Introdução

1.1 Considerações gerais	1
1.2 Organização da dissertação	2

Capítulo II – Enquadramento das tecnologias construtivas de barragens

2.1 Generalidades	5
2.2 Tipos de barragens	5
2.2.1 Barragens de aterro	7
2.2.2 Barragens de betão convencional	9
2.2.3 Barragens de Betão Compactado com Cilindros (BCC).....	11
2.3 Evolução da utilização do BCC em barragens	11
2.4 Projectos de BCC em barragens portuguesas	14
2.4.1 Barragens do Baixo Sabor	16
2.4.2 Barragens de Ribeiradio – Ermida	17
2.4.3 Barragens de Foz Tua	18
2.4.4 Barragens do Fridão	18
2.4.5 Barragens de Alvito	19
2.5 Aplicação do BCC na Barragem do Pedrógão	19
2.5.1 Bloco experimental	21
2.5.2 Colocação e transporte	24
2.5.3 Espalhamento e compactação	25
2.5.4 Órgãos anexos	26
2.6 Juntas	28

2.7	Outro método de colocação do BCC – método “rampado”	30
-----	---	----

Capítulo III – Execução de BCC

3.1	Generalidades	33
3.2	Materiais de construção no BCC	33
3.2.1	Agregados	33
3.2.2	Ligante	34
3.2.3	Água	35
3.2.4	Adjuvantes	35
3.3	Preparação da mistura	36
3.4	Propriedades da mistura	37
3.4.1	Massa volúmica	37
3.4.2	Quantidade de água à saída da misturadora	38
3.4.3	Trabalhabilidade	38
3.4.4	Calor gerado	39
3.5	Parte experimental	39
3.5.1	Granulometria dos agregados	40
3.5.2	Baridade dos agregados	52
3.5.3	Mistura dos agregados	54
3.5.4	Preparação dos provetes	57
3.5.4.1	Mistura	57
3.5.4.2	Compactação dos provetes	58
3.5.4.3	Provetes de BCC para ensaios mecânicos	62

Capítulo IV – Considerações finais	67
---	-----------

Referências Bibliográficas	69
---	-----------

Anexos

Anexo I – Procedimento laboratorial

I.1	Granulometria	75
I.2	Proctor pesado	77

Anexo II – Funcionalidades da Máquina de Hoek

II.1	Enquadramento	81
------	---------------------	----

II.2	Máquina de Hoek	81
II.3	Constituintes da caixa de corte de diaclases	82
II.4	Descrição do ensaio	83
II.5	Preparação dos provetes	84

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Compactação do BCC	1
Figura 2.1 - Mapa da distribuição das barragens em Portugal	6
Figura 2.2 - Barragem de terra - Barragem de Santa Clara (Ourique)	7
Figura 2.3 - Barragem de enrocamento – Barragem de Odeleite	8
Figura 2.4 - Barragem de terra – enrocamento – Barragem do Beliche	8
Figura 2.5 - Barragem de Gravidade - Carrapatelo	9
Figura 2.6 - Barragem em Arco - Barragem do Alto Lindoso	10
Figura 2.7 - Barragem em arco de dupla curvatura – Barragem de Alqueva	10
Figura 2.8 - Barragem de BCC, Barragem de Elkwater Fork	11
Figura 2.9 - Barragem de Shimajigawa	12
Figura 2.10 - Barragem de Tamagawa	12
Figura 2.11 - Barragem de Williw Creek	13
Figura 2.12 - Barragens de Betão Compactado com Cilindros	13
Figura 2.13 - Localização das barragens em BCC projectadas em Portugal	15
Figura 2.14 - Barragens do Baixo Sabor	16
Figura 2.15 - Barragem de Ribeiradio	17
Figura 2.16 - Barragem de Ermida	17
Figura 2.17 - Barragem de Foz Tua	18
Figura 2.18 - Barragem de Fridão	18
Figura 2.19 - Barragem do Alvito	19
Figura 2.20 - Localização e aspecto da Barragem de Pedrógão	20
Figura 2.21 - Localização do bloco experimental	21
Figura 2.22 - Realização do bloco experimental	22
Figura 2.23 - Perfil tipo da barragem de Pedrogão	23
Figura 2.24 - Transporte do betão através de telas transportadoras e sua colocação	25
Figura 2.25 - Método de colocação e espalhamento do BCC	26
Figura 2.26 - Descarregadores	27
Figura 2.27 - Central hidroeléctrica da barragem do Pedrógão	28
Figura 2.28 - Juntas horizontais	29
Figura 2.29 - Colocação de juntas verticais	29

Figura 2.30 - Esquema de colocação do BCC segundo o método “rampado”	30
Figura 3.1 - Misturadoras	37
Figura 3.2 - Peneiros ASTM utilizados e respectivas aberturas das malhas	40
Figura 3.3 - Curva das amostras de areia de rio	44
Figura 3.4 - Curva das amostras de brita fina	46
Figura 3.5 - Curva das amostras de brita média	49
Figura 3.6 - Curva das amostras de brita grossa	51
Figura 3.7 - Temperatura da estufa e esquartelamento	52
Figura 3.8 - Aspecto do dispositivo utilizado e enchimento do balde	53
Figura 3.9 - Nivelamento do balde (areia); Enchimento do balde (britas)	53
Figura 3.10 - Curvas granulométricas dos agregados e da mistura final	57
Figura 3.11 - Aspecto da mistura	58
Figura 3.12 - Aspecto de uma das camadas no molde e martelo vibratório	59
Figura 3.13 - Curva de compactação com determinação do teor em água óptimo	60
Figura 3.14 - Dimensões e formas dos provetes a ensaiar	62
Figura 3.15 - Aspecto dos provetes cúbicos preliminares	63
Figura 3.16 - Obtenção de provetes cilíndricos	63
Figura 3.17 - Aspecto dos tarolos	64
Figura 3.18 - Carotes retiradas	65
Figura 3.19 - Aspecto do corte de um dos blocos preliminares	65
Figura 3.20 - Subdivisão de meio bloco em provetes cúbicos	66
Figura I.1 - Material a secar na estufa	75
Figura I.2 - Peneiração e agitador	76
Figura I.3 - Material retido nos peneiros e respectiva pesagem	76
Figura I.4 - Curva granulométrica	77
Figura I.5 - Martelo vibratório Kango	78
Figura II.1 - Caixa de corte de diaclases ("Máquina" de Hoek)	81
Figura II.2 - Componentes da "máquina" de Hoek	82
Figura II.3 - Componentes da "máquina" de corte	83
Figura II.4 - Macaco hidráulico	84

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Barragens projectadas e respectivos volumes de escavação previstos	15
Tabela 2.2 - Capacidade de armazenamento das albufeiras	16
Tabela 2.3 - Volume de material envolvido na barragem	20
Tabela 2.4 - Composição das misturas utilizadas	23
Tabela 3.1 - Tipos de adjuvantes que alteram a reologia dos betões	35
Tabela 3.2 - Massa volúmica de misturas em algumas barragens no Mundo	38
Tabela 3.3 - Número dos peneiros, aberturas e séries granulométricas	41
Tabela 3.4 - Resumo da granulometria da areia de rio (amostra 1)	42
Tabela 3.5 - Resumo da granulometria da areia de rio (amostra 2)	42
Tabela 3.6 - Resumo da granulometria da areia de rio (amostra 3).....	43
Tabela 3.7 - Análise granulométrica da areia de rio	43
Tabela 3.8 - Resumo da granulometria da brita fina (amostra 1)	44
Tabela 3.9 - Resumo da granulometria da brita fina (amostra 2)	45
Tabela 3.10 - Resumo da granulometria da brita fina (amostra 3)	45
Tabela 3.11 - Análise granulométrica da brita fina	46
Tabela 3.12 - Resumo da granulometria da brita média (amostra 1)	47
Tabela 3.13 - Resumo da granulometria da brita média (amostra 2)	47
Tabela 3.14 - Resumo da granulometria da brita média (amostra 3)	48
Tabela 3.15 - Análise granulométrica da brita média	48
Tabela 3.16 - Resumo da granulometria da brita grossa (amostra 1)	49
Tabela 3.17 - Resumo da granulometria da brita grossa (amostra 2)	50
Tabela 3.18 - Resumo da granulometria da brita grossa (amostra 3)	50
Tabela 3.19 - Análise granulométrica da brita grossa	51
Tabela 3.20 - Fuso granulométrico dos agregados na mistura	55
Tabela 3.21 - Percentagem das classes de agregados na mistura	55
Tabela 3.22 - Granulometria dos materiais utilizados e respectiva mistura	55
Tabela 3.23 - Quantidade total de agregados na mistura	58
Tabela 3.24 - Síntese dos materiais utilizados no ensaio Proctor pesado	59
Tabela 3.25 - Peso húmido dos provetes	59
Tabela 3.26 - Tabela resumo do ensaio de compactação	60

Tabela 3.27 - Quantidade total de agregados e água na mistura final de BCC	61
Tabela I.1 - Características do equipamento de compactação	78
Tabela I.2 - Características do molde do ensaio Proctor pesado	78
Tabela II.1 - Limites máximos e mínimos das dimensões dos provetes	84

Capítulo I

Introdução

1.1 Considerações gerais

Para a realização desta dissertação foram estudados aspectos teóricos, experimentais e construtivos relativos às características e aplicações do betão compactado com cilindros (BCC).

Podem-se encontrar diversas definições de BCC, sendo a mais aceite a do “American Concrete Institute” (ACI, 1999), que define BCC como sendo um material formado pela mistura de cimento, agregados grossos (britas) e finos (areias) e água, com ou sem incorporação de adjuvantes (plastificantes, fluidificantes e super-plastificantes, indutores de ar, aceleradores ou retardadores de presa, hidrófugos, descofrantes, inibidores de corrosão, etc.) e adições (fillers, pigmentos/colorantes, cinzas volantes, sílica de fumo, etc.).

Assim, o BCC tem os mesmos constituintes do betão convencional (agregados, cimento, água e ocasionalmente adjuvantes ou adições). Trata-se de uma mistura que é alternadamente compactada por cilindros vibradores (vibração externa) utilizados na compactação dos solos, figura 1.1.



Figura 1.1 – Compactação do BCC (EDIA, 2009).

A colocação do BCC em obra é efectuada através do espalhamento contínuo de camadas de betão de espessura “reduzida” (aproximadamente 30 cm), traduzindo assim um grande número de juntas horizontais. O betão na zona destas juntas horizontais apresenta uma qualidade inferior à do betão no interior das camadas, por evidenciar menor resistência ao corte e à tracção, permitindo uma maior permeabilidade, o que poderá afectar o comportamento da obra. Contudo as características acima resumidas tornam o BCC um betão simples, rápido e económico consoante o local ou o tipo de barragem assim o permitam.

No início da dissertação procurou-se descrever experimentalmente o fabrico de BCC, em barragens, estudando as juntas de ligação entre camadas consecutivas. Porém, devido a dificuldades de ordem logística esse trabalho não teve continuidade, sendo no entanto incluídos em Anexos os resultados obtidos até à interrupção do trabalho experimental.

1.2 Organização da dissertação

No **Capítulo I** é feita uma breve descrição/caracterização do betão compactado com cilindros, bem como os seus constituintes. É também apresentado um enquadramento da dissertação relativamente ao trabalho a desenvolver.

No **Capítulo II**, após uma descrição sucinta dos diferentes tipos de barragens, apresenta-se um breve historial das barragens de BCC. Em seguida, é referido o primeiro caso deste tipo de obra em Portugal: barragem de Pedrógão.

No **Capítulo III**, descrevem-se os materiais de construção (agregados, ligantes, água e adjuvantes) utilizados no BCC estudado nesta dissertação, assim como o seu fabrico e suas propriedades. Descreve-se também o ensaio de granulometria, baridade e o ensaio de compactação com auxílio do martelo vibratório (Kango). Também se descreve a preparação dos provetes a serem utilizados no estudo das juntas do betão compactado com cilindros, resultantes dos ensaios laboratoriais, bem como as dificuldades com que o autor se foi deparando no decorrer desses trabalhos.

Por último, no **Capítulo IV**, apresentam-se as conclusões resultantes do trabalho desenvolvido, bem como uma proposta de trabalho futuro.

No **Anexo I**, descreve-se o procedimento laboratorial para a realização dos ensaios de granulometria, baridade e compactação com recurso ao ensaio de compactação Proctor pesado e utilização do martelo vibratório Kango

No **Anexo II**, apresenta-se a máquina de corte de rocha ou máquina de Hoek, bem como a descrição do ensaio e algumas precauções a ter no decorrer do mesmo.

As imagens ou fotografias não referenciadas são da responsabilidade do autor com excepção das fotografias 2.22 e 2.24 que foram fornecidas pelo Sr. Engº Cerqueira Bastos, da empresa Edifer.

Capítulo II

Enquadramento das tecnologias construtivas de barragens

2.1 Generalidades

Neste capítulo descrevem-se os diferentes tipos de construção de barragens. É também referido por ordem cronológica a evolução da utilização do Betão Compactado com Cilindros (BCC) em barragens, bem como a sua utilização e aplicação em Portugal, como é o caso da Barragem do Pedrógão (primeira aplicação do BCC em barragens portuguesas) a qual se tornou objecto de estudo mais profundo.

2.2 Tipos de barragens

Pode definir-se barragem como sendo uma estrutura que retém a água de um rio, formando um lago artificial com grande importância para o desenvolvimento de um território, através das mais variadas finalidades como sendo produção de energia, regadio, abastecimento de populações, recreio, entre outras.

O crescimento e desenvolvimento económico está directamente relacionado com a construção de barragens, existindo por todo o mundo mais de 45 000 grandes barragens (alturas superiores a 15 m e capacidade de armazenamento superior a 3 milhões de metros cúbicos). O país com mais barragens é a China, que se destaca com mais de 22 000 barragens, enquanto que em Portugal, podemos encontrar cerca de 155 barragens, figura 2.1 (INAG, 2010), com mais de 15 m de altura e capacidade de armazenamento superior a 1 milhão de metros cúbicos.

Desde há muito tempo que se sentiu necessidade de armazenar água proveniente das chuvas de forma a poder reutilizá-la durante as épocas em que se sinta escassez da mesma. Por este motivo, diz-se que as barragens fazem a transferência de água no tempo.

As barragens podem ser de três tipos conforme a técnica e materiais utilizados:

- Barragem de Aterro;
- Barragem de Betão Convencional;
- Barragem de Betão Compactado com Cilindros.



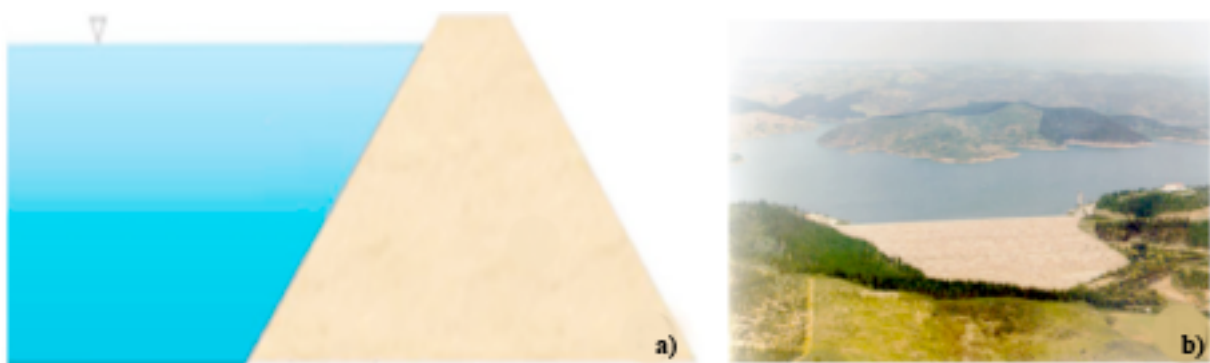
Figura 2.1 - Mapa da distribuição das barragens em Portugal (Adaptado de INAG, 2010).

2.2.1 Barragens de Aterro

Estas barragens são construídas em vales largos, normalmente em solos argilosos ou arenosos, ou seja, em terrenos de fundação com características deficientes. Os materiais de construção para estas barragens provêm de áreas de empréstimo localizadas o mais próximo possível do local da obra. Aqueles materiais e as condições de fundação são muito importantes para a sua construção pois vão definir o perfil tipo, sendo para isso necessário efectuar o controlo da percolação de água ou então criar barreiras de estanqueidade para evitar a percolação da mesma. Pode então definir-se três tipos de barragens de aterro relativamente ao material utilizado:

- Barragem de Terra;
- Barragem de Enrocamento;
- Barragem de Terra-Enrocamento.

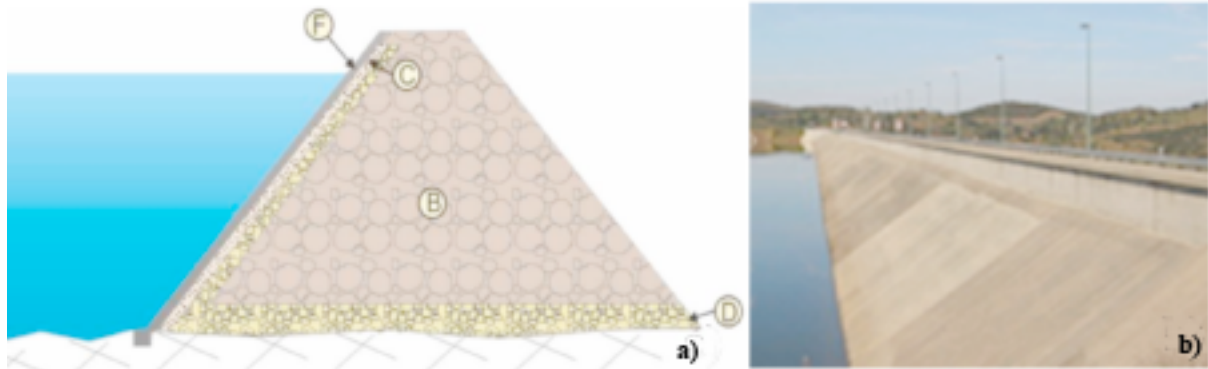
Uma barragem de terra é uma obra característica de regiões de topografia suave e vales amplos. A água presente no reservatório impõe esforços ao terreno pelo seu próprio peso. Na figura 2.2 apresenta-se um desenho esquemático deste tipo de barragens, bem como um fotografia de uma barragem em Portugal, (Barragem de Santa Clara), localizada no concelho de Odemira e inaugurada em 1968, tendo sido na altura considerada a maior barragem da Europa construída em terra.



a) Perfil esquemático de uma barragem de terra (Carvalho, R., 2009);
b) Barragem de Santa Clara (Ourique) (AB Mira, 2011).

Figura 2.2 - Barragem de terra.

Relativamente à barragem de enrocamento, figura 2.3, poder-se-á instalar um elemento impermeabilizante ao longo do paramento de montante impermeabilizado por meio de placas de betão, betão asfáltico, chapa metálica, betão betuminoso ou por geomembranas, como também se poderá optar por um núcleo de material argiloso como elemento impermeabilizante.

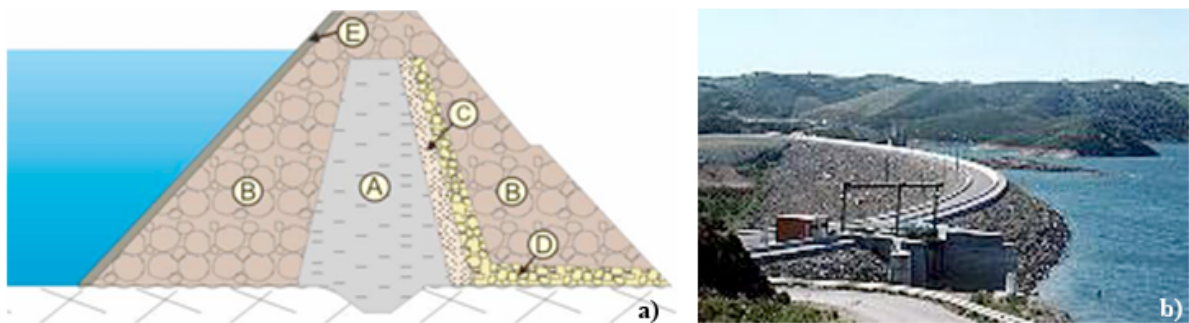


a) Perfil esquemático de uma barragem de enrocamento [Legenda: B - enrocamento; C – filtros; D – drenos; F – paramento impermeabilizado] (Carvalho, R., 2009);

b) Barragem de Odeleite [52].

Figura 2.3 - Barragem de enrocamento.

As barragens de terra-enrocamento são realizadas em regiões onde a disponibilidade de materiais de empréstimo é deficiente e a utilização apenas de betão pode tornar a obra demasiado cara e aumentar substancialmente o tempo de construção. No caso da barragem do Beliche, figura 2.4, esta barragem é formada por um núcleo de solo argiloso com os maciços estabilizadores em enrocamento.



a) Perfil esquemático de uma barragem terra-enrocamento.[Legenda: A – núcleo interno impermeabilizante, B - enrocamento; C – filtros; D – drenos; E – protecção (enrocamento – *rip-rap*)] (Carvalho, R., 2009);

b) Barragem do Beliche (INAG, 2009).

Figura 2.4 – Barragem de terra-enrocamento.

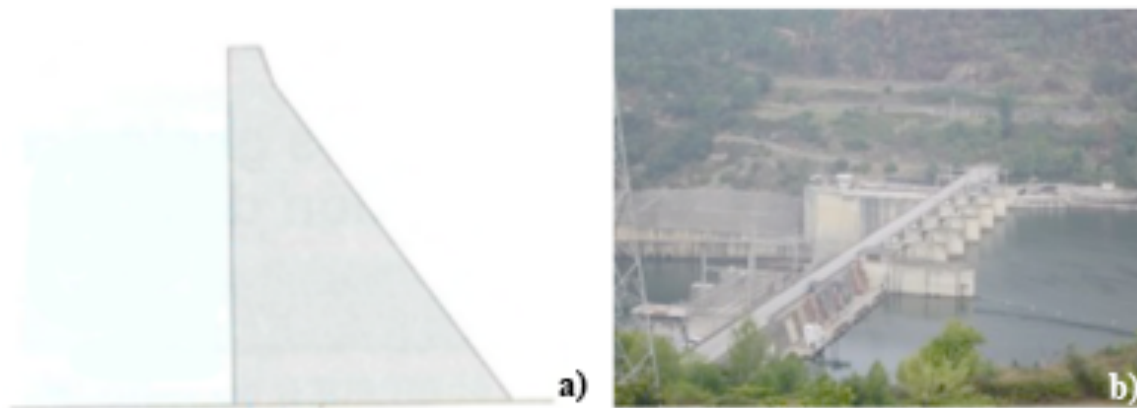
2.2.2 Barragens de Betão Convencional

As barragens de betão convencional são construídas em áreas em que os vales encaixantes são fechados visto que a resistência do betão tem algumas limitações no que respeita ao comprimento das barragens. Este tipo de construção de barragens ,apesar de ser muito resistente, torna-se vulnerável no caso de haver algum erro de projecto levando a que haja fendilhação provocada pela força da água. Também se pode der o caso da água subir até ao nível da cota máxima de cheia provocando o galgamento da mesma, sendo esta limitação menos prejudicial que a primeira em termos de vida útil da barragem.

Quanto ao perfil tipo as barragens de betão podem ser:

- Barragem Gravidade;
- Barragem Arco;
- Barragem Arco com Dupla Curvatura

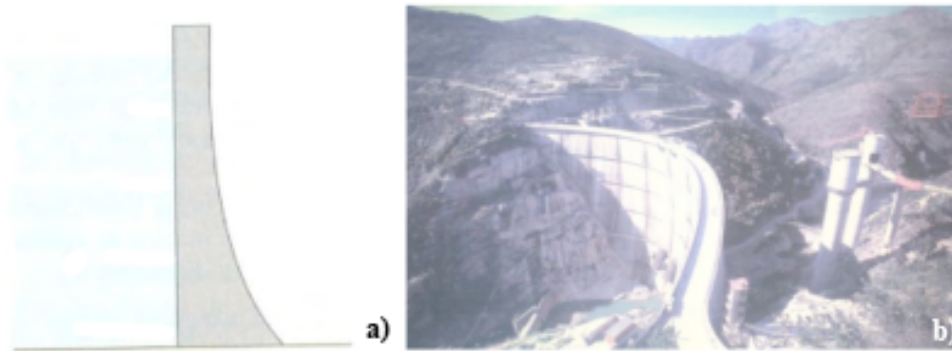
Uma barragem gravidade é constituída por um paredão de betão que resiste à impulsão hidrostática através do peso próprio do seu corpo. Sendo que a resultante das forças actuanes é transmitida ao solo sobre o qual se apoia (leito do rio). Estas barragens podem ser construídas por alvenaria de pedra, betão ciclópico e betão armado, figura 2.5.



a) Perfil esquemático de uma barragem gravidade (Vallejo, 2006);
b) Barragem do Carrapateiro (INAG, 2009).

Figura 2.5 – Barragem gravidade.

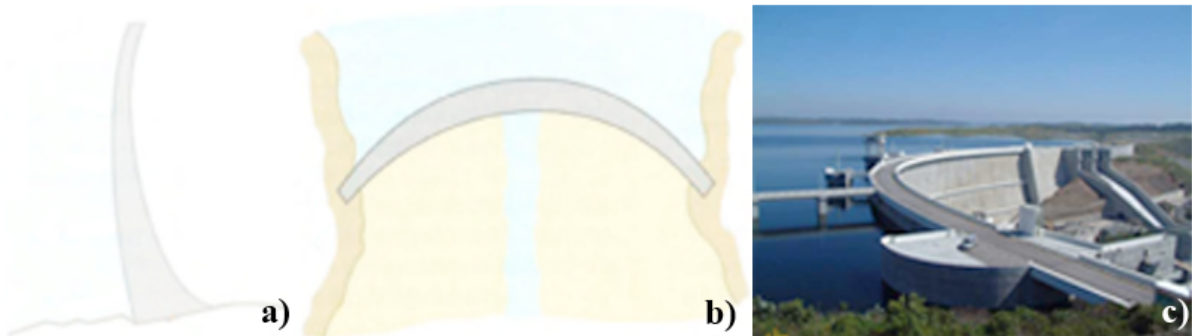
A barragem em arco é construída em vales relativamente apertados permitindo que a altura seja por vezes maior que o comprimento do corpo da barragem. Devido ao efeito de arco a barragem tende a resistir ao deslocamento para jusante devido às forças em parte se transmitirem, lateralmente para os encontros. Para a sua construção é necessário a existência de condições naturais especiais tais como margens altas constituídas por rocha resistente e sã, fundo do rio igualmente em rocha resistente e sã. Podem ser construídas em betão e/ou betão armado, figura 2.6.



a) Perfil esquemático de uma barragem arco (Vallejo, 2006);
b) Baaragem do Alto Lindoso [51].

Figura 2.6 – Barragem arco.

Relativamente às barragens de arco de dupla curvatura podem ser consideradas barragens mistas entre as de arco e as de gravidade, diferindo apenas na espessura muito menor que as daquelas. Permitem reduzir a espessura do arco e limitar os esforços de tracção a fim de evitar fissuração. São menos exigentes quanto ao tipo da sua fundação e construídas em betão ciclópico, figura 2.7.



a) e b) Perfil esquemático de uma barragem arco de dupla curvatura (Vallejo, 2006);
c) Barragem de Alqueva (INAG, 2008).

Figura 2.7 – Barragem arco de dupla curvatura.

2.2.3 Barragens de Betão Compactado com Cilindros (BCC)

Relativamente a este tipo de barragem, principal objectivo desta dissertação, o método de construção é idêntico à técnica de betão convencional, sendo a técnica do BCC mais rentável devido à sua fácil colocação, a espessura das camadas é inferior, maior rapidez de execução e baixos custos inerentes à construção, tornando-as mais eficientes que as barragens de betão convencional, figura 2.8.



Figura 2.8 – Barragem de BCC, Barragem de Elkwater Fork (Nagataki, et al. 2008).

2.3 Evolução da utilização do BCC em barragens

A primeira utilização de material semelhante ao BCC, data do início de década de 60, aplicada na construção de alguns componentes de barragens, como o núcleo impermeável da ensecadeira da barragem de Shihmen (1960 – 1961), na Tailândia, (Sagrado, 2008).

Logo a seguir, 1961 – 1965, foi construída em Itália, a barragem de Alpe Gera, que pode ser considerada a pioneira nas barragens em BCC. Foi utilizado um betão pobre, compactado através de vibração interna, espalhado em camadas com 70 cm de altura na extensão de todo o vale.

Nos primeiros anos da década de 70, entre 1972 e 1974, com vista à execução da barragem de Tim Ford (EUA) foram efectuados ensaios sobre um betão pobre, de granulometria controlada, transportado em camiões, espalhado com bulldozer e compactado com cilindros vibradores (ACI, 1999).

Em meados da mesma década (1976), teve lugar a primeira aplicação do BCC, na construção da ensecadeira da barragem de Ohkawa (Nagataki, *et al*, 2008). Antecedendo à construção da primeira barragem a nível mundial em BCC, barragem de gravidade de Shimajigawa, figura 2.9, no Japão (1978), demorando três anos a sua execução.



Figura 2.9 - Barragem de Shimajigawa (Nagataki, *et al*. 2008).

Uma década depois (1987) terminou a construção da segunda maior barragem de BCC no mundo, barragem de Tamagawa, figura 2.10.



Figura 2.10 - Barragem de Tamagawa (Nagataki, *et al*. 2008).

Relativamente a barragens totalmente construídas em BCC, estas datam do início dos anos oitenta (1982) nos EUA, com a construção da barragem de Willow Creek (Sagrado, 2008), figura 2.11.



Figura 2.11 - Barragem de Willow Creek (Sagrado, 2008).

Estima-se que possam existir cerca de 400 barragens em BCC em todo o mundo. Actualmente, este tipo de betão aparece associado essencialmente à pavimentação rodoviária e à construção de barragens. Por outro lado, começa também a ser aplicado em diversas obras de engenharia, como o alargamento de barragens de aterro ou a recuperação de barragens.

A escolha do BCC está relacionada com as condições de fundação, condições sísmicas da área, velocidade construtiva, viabilidade e custo dos ligantes e agregados.



a) Ralco, Chile; b) Upper Stillwater, EUA.; c) Al-Wehdah, Jordânia; d) Beydag, Turquia.

Figura 2.12 - Barragens de Betão Compactado com Cilindros (ORTEGA, 2003).

Pode-se considerar que algumas das principais vantagens da utilização de BCC associado às barragens prende-se com o tipo de mistura utilizada, aos métodos de produção, mas principalmente à sua facilidade de produção e de colocação. Outras vantagens que se podem associar a este tipo de betão residem nos baixos custos de operação, na possibilidade de incorporar órgãos hidráulicos no corpo da barragem (galerias e descarregadores de cheias), velocidade construtiva, e minimização de cofragens relativamente às utilizadas no betão convencional.

Relativamente aos custos, estes podem reduzir-se em 25% a 50% do custo total da obra, quando a mesma é efectuada com betão convencional. Esta redução está directamente relacionada com o custo dos agregados e ligantes, e com a rápida e fácil colocação deste betão em curtos espaços de tempo. Estes custos ainda podem sofrer um decréscimo no caso dos agregados na proximidade da obra terem qualidade adequada para o efeito (US Army, 2000).

Por oposição, as desvantagens da utilização do BCC estão ligadas às avarias com os equipamentos de produção, fabrico, ou mesmo ao nível de equipamentos de transporte e compactação. Estas limitações podem ser ainda condicionadas por operações de construção deficientes, por falta de componentes para o fabrico do betão, ou por condições climatéricas adversas (INAG, 2002).

Durante a fase construtiva, é necessária a existência de um maior número de juntas, o que pode afectar a estabilidade da estrutura e prejudicar o tempo de vida da obra, tornando esta mais susceptível à ocorrência de percolação.

Como consequência de uma maior velocidade de construção, têm-se verificado inúmeros benefícios como sejam, a redução de custos de administração, a utilização antecipada do projecto, precoce desocupação do estaleiro, menores custos de construção, entre outros.

2.4 Projectos de BCC em barragens portuguesas

Em Portugal, para além da já construída barragem de Pedrógão, descrita na secção seguinte, existem mais cinco barragens de BCC projectadas, estando previsto que a sua construção termine entre 2013 e 2016, tabela 2.1. Essas barragens, Baixo Sabor (Torre de Moncorvo), Ribeiradio – Ermida (Sever do Vouga), Foz Tua (Alijó), Fridão (Amarante) e Alvito (Vila Velha de Rodão) serão todas localizadas a norte do Tejo, figura 2.13, tendo como entidade

responsável a EDP com os objetivos principais de produção de energia e de abastecimento de água.

Tabela 2.1 - Barragens projectadas e respectivos volumes de escavação previstos (EDP, 2010).

Barragem	Data de Início	Data de Conclusão	Vol. Escavação [m ³]	Vol. Betão [m ³]
Baixo Sabor	2008	2013	3 000 000	1 100 000
Ribeiradio-Ermida	2009	2013	573 000	375 000
Foz Tua	2010	2014	-	-
Fridão	2011	2016	-	-
Alvito	2011	2015	-	-



a) Fridão, b) Foz Tua, c) Baixo Sabor, d) Ribeiradio-Ermida, e) Alvito.

Figura 2.13 – Localização das barragens em BCC projectadas para Portugal (EDP, 2010).

As barragens referidas anteriormente têm como principal objectivo a produção de energia, se bem que todas elas apresentam grande capacidade de armazenamento de água, superior a $60 \times 10^6 \text{ m}^3$, como se refere na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Capacidade de armazenamento das albufeiras (EDP, 2010).

Barragem	Armazenamento [m^3]
Baixo Sabor	630×10^6
Ribeiradio-Ermida	87×10^6
Foz Tua	66×10^6
Fridão	70×10^6
Alvito	341×10^6

De salientar que, das referidas barragens, a única que se encontra em fase de construção é a Barragem de Baixo Sabor. Relativamente à barragem de Ribeiradio-Ermida, ainda se encontra em fase de construção dos acessos, enquanto que as restantes ainda estão em fase de projecto.

2.4.1 Barragens do Baixo Sabor

As barragens do Baixo Sabor, figura 2.14, localizam-se na região de Torre de Moncorvo, tendo a sua execução tido início em 2008. A montante uma barragem com o corpo em abobada de dupla curvatura, com altura de 123 m (BCC) e a jusante uma barragem de gravidade, com altura de 45 m (Betão vibrado), com capacidade de armazenamento de água de 630 e 450 milhões de metros cúbicos respectivamente. De salientar que inicialmente estas barragens seriam construídas segundo a técnica de BCC, mas que posteriormente optou-se pela construção em betão convencional por ser mais favorável economicamente (EDP, 2010).

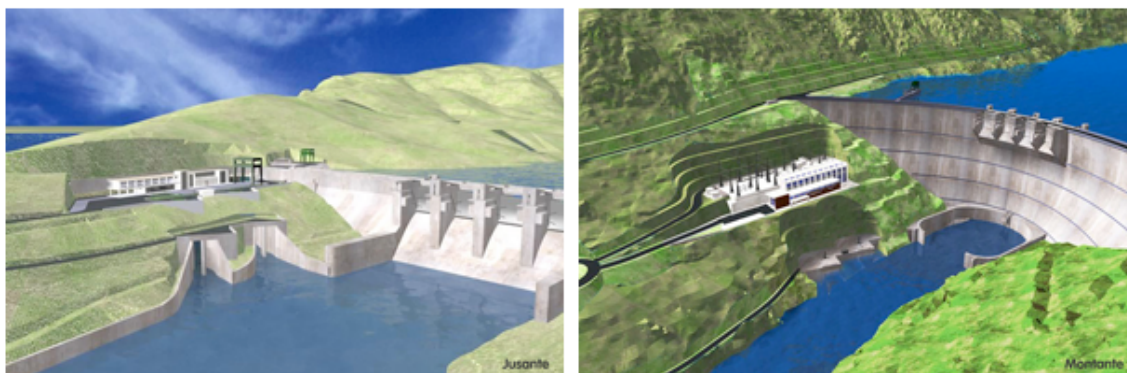


Figura 2.14 – Barragens do Baixo Sabor (EDP, 2010).

2.4.2 Barragens de Ribeiradio - Ermida

As barragens de Ribeiradio – Ermida também projectadas para serem construídas em BCC situam-se na região de Aveiro, no rio Vouga , figura 2.13. Tal com a barragem do Baixo Sabor, o principal objectivo das barragens de Ribeiradio – Ermida é a produção de energia hidroeléctrica e também para abastecimento da população, irrigações e fins agrícolas. O início da sua construção estava previsto para o ano de 2009, mas devido a atrasos diversos só em Junho de 2011, foram efectuados os acessos (EDP, 2011).

A barragem de Ribeiradio, é uma barragem de gravidade com 76 m de altura, com capacidade de armazenamento de 136 hm³ (EDIA, 2011), figura 2.15.

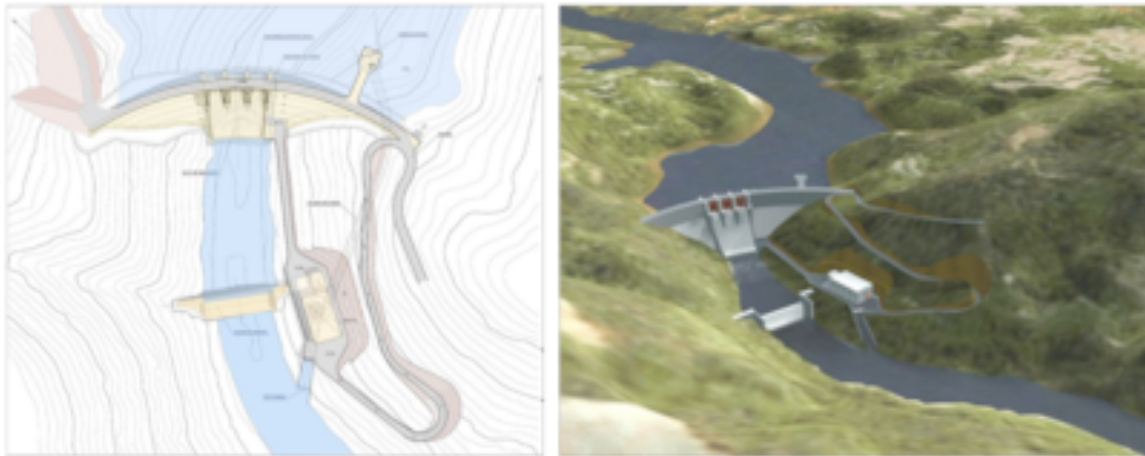


Figura 2.15 –Planta e representação esquemática da barragem de Ribeiradio (EDP, 2010).

Relativamente à barragem de Ermida, figura 2.16, prevê-se a sua construção com 35 m de altura, e capacidade de armazenamento de 2 hm³ (EDIA, 2011).

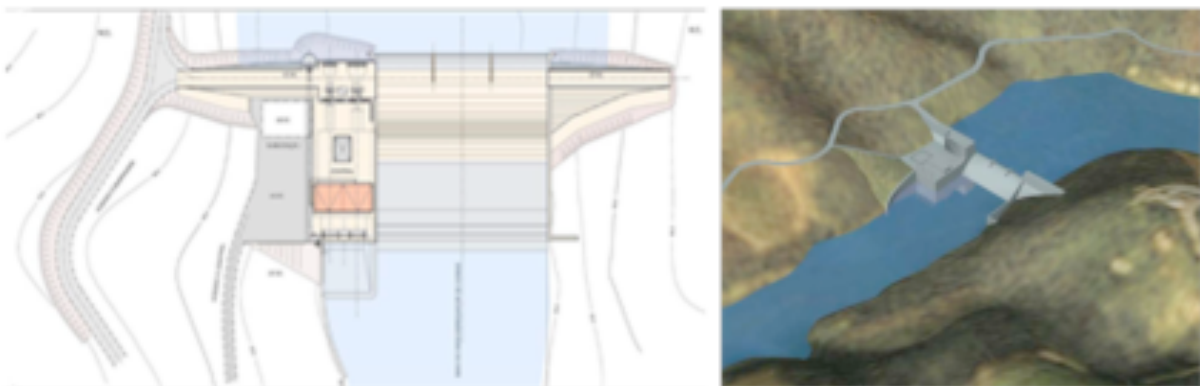


Figura 2.16 – Planta e representação esquemática da barragem de Ermida (EDIA, 2010).

2.4.3 Barragem de Foz Tua

Segundo o projecto apresentado pela EDP (dono de obra), a barragem de Foz Tua, figura 2.17, será instalada no concelho de Alijó, a cerca de 1 km da confluência do rio Tua e do rio Douro, figura 2.13, com o objectivo principal de produção de energia. De referir, que segundo a EDP, os trabalhos iniciaram-se em Fevereiro de 2011. A sua construção será efectuada em BCC e será uma barragem do tipo abóbada de dupla curvatura com 108 m de altura. Prevendo-se o início da sua exploração a partir de 2015 (EDP, 2011).



Figura 2.17 – Planta e representação esquemática da barragem de Foz Tua (EDP, 2010).

2.4.4 Barragem de Fridão

Situada no rio Tâmega (afluente da margem direita do rio Douro), no concelho de Amarante, figura 2.13, a barragem do Fridão servirá principalmente para aproveitamento hidroeléctrico. Trata-se de um sistema de dois escalões, um escalão principal (a montante) e o escalão de jusante. O escalão principal (Fridão), figura 2.18, terá uma altura máxima de 110 m e com capacidade de armazenamento de 210 hm³ (EDP, 2011) prevendo-se a sua conclusão em 2016.

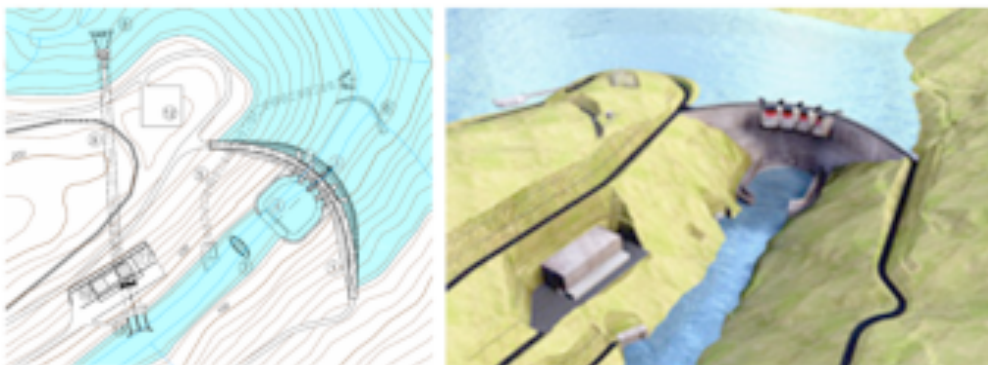


Figura 2.18 – Planta e representação esquemática da barragem de Fridão (EDP, 2010).

2.4.5 Barragem de Alvito

A construção da barragem do Alvito, figura 2.19, está prevista para junto da confluência do rio Ocreza com a ribeira de Alvito (afluentas da margem direita do rio Tejo), no concelho de Vila Velha de Rodão, distrito de Castelo Branco. Trata-se também de uma barragem para aproveitamento hidroeléctrico e, como as anteriores, a sua técnica de construção será por BCC. Esta barragem teria o seu início de construção previsto para Junho de 2011 (o que não se verificou) e o seu término para Dezembro de 2015, correspondente ao início do aproveitamento ao qual está destinada. (EDP, 2011).

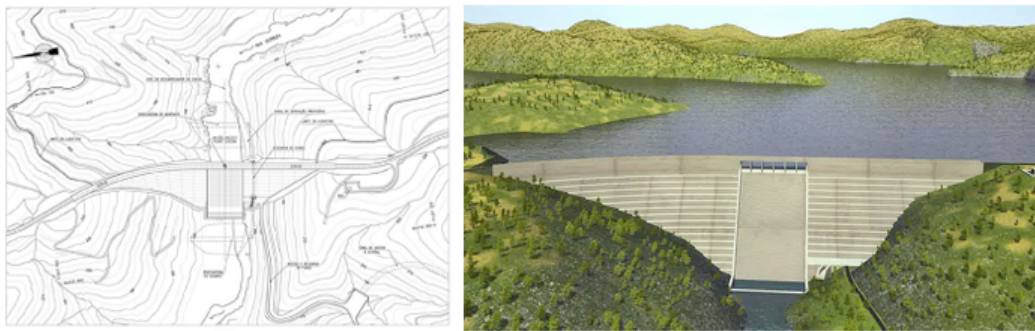


Figura 2.19 – Planta e representação esquemática da barragem do Alvito (EDP, 2010).

2.5 Aplicação do BCC em Portugal – Barragem de Pedrógão (Baixo Alentejo)

Em Portugal a primeira utilização do BCC em barragens data de 2005 (final da obra), aplicada na Barragem de Pedrógão, localizada no concelho da Vidigueira, distrito de Beja, a 23 quilómetros a jusante da albufeira de Alqueva, figura 2.20.

Esta barragem, de 39 m de altura máxima sobre as fundações e com uma capacidade útil de 54 hm³, permite “(...) a operação de turbinamento/bombagem na central hidroeléctrica de Alqueva”, possibilitando, dessa forma, a recuperação dos caudais utilizados na produção de energia eléctrica. “ (in Agronotícias, 2009). A barragem do Pedrógão foi construída com os seguintes objectivos:

- modular os caudais turbinados na central de Alqueva, armazenando e restituindo os mesmos ao Guadiana em regime não concentrado;
- otimizar a produção de energia eléctrica do sistema; fornecer águas para rega dos subsistemas de Pedrógão e Ardila;

- garantir os caudais ecológicos e ambientais exigidos a jusante;
- assegurar a passagem dos peixes.

A construção desta barragem foi efectuada através de duas técnicas: uma, com base no BCC a outra, em betão convencional, sendo a EDIA (Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, SA) a entidade responsável pela obra.



Figura 2.20 - Localização e aspecto da Barragem de Pedrógão (EDIA, 2011).

Na tabela 2.3 é apresentado o volume de materiais que foi necessário para a construção da barragem.

Tabela 2.3 – Volume de material envolvido na barragem (EDIA, 2009).

Material	Volume (m ³)
Escavações	700 000
Betão Convencional	250 000
Betão Compactado com Cilindros	150 000



Figura 2.22 – Realização do bloco experimental (Cedida por Artur Martins - EDIA).

Relativamente aos agregados utilizados, estes foram agrupados em 3 classes consoante a sua granulometria, havendo uma dimensão máxima e mínima, em milímetros, das partículas: brita (19/35), brita (5/19), areia (0/5).

O cimento utilizado foi do tipo CEM II A/L 42,5R, com 0,7% cinzas retardadoras de presa.

Segundo a ficha técnica consultada na SECIL, este cimento está certificado pela norma NP EN 197-1; 2001, tendo na sua composição:

- clínquer Portland (80 a 94%);
- calcário (6 a 20%);
- outros constituintes (0 a 5%).

Trata-se de um cimento com boas características de resistência ($\sigma \geq 20$ MPa nos primeiros 2 dias, e $42,5 \text{ MPa} \leq \sigma \leq 62,5 \text{ MPa}$ aos 28 dias) e trabalhabilidade.

Este cimento é também bastante utilizado em:

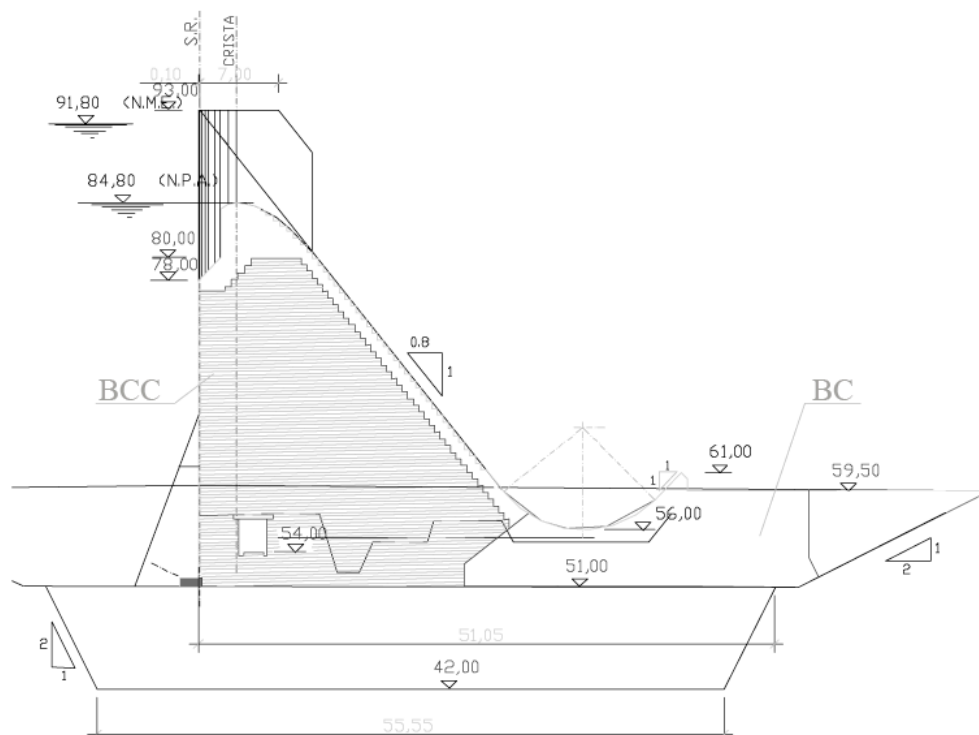
- betão pré-esforçado;
- betão projectado;

- betão fabricado em obra de média ou elevada resistência;
- reforço e reparação de betão estrutural.

Na tabela 2.4, estão apresentadas as misturas de BCC utilizadas na construção da barragem, figura 2.23, sendo que a mistura de BCCEC (Betão Compactado com Cilindros Enriquecido com Calda) se refere a um enriquecimento em calda tal como o nome indica relativamente ao BCC utilizado.

Tabela 2.4 - Composição das misturas utilizadas (ORTEGA *et al*, 2004).

Componentes das misturas [kg/m ³]	BCC	BCCEC
Cimento II /A-L 42,5	55-75	72
Cinzas Volantes	130-180	217
Brita (19/38)	550-610	546
Brita (5/19)	680-750	669
Areia (0/5)	640-740	589
Filler	70-80	65
H ₂ O	112±5	156
Sika Plastiroute	1,30-1,70	1,40



Legenda: BCC – Betão Compactado com Cilindros; BC – Betão convencional.

Figura 2.23 – Perfil tipo da barragem de Pedrógão. Distribuição das misturas (Adaptado de ORTEGA *et al*, 2004).

Após a construção do bloco experimental, o material é ensaiado laboratorialmente para que se possa definir a melhor quantidade de agregados utilizados na mistura para a execução do corpo da barragem, como se apresentou na tabela 2.4. Estes ensaios serão descritos no capítulo III.

2.5.2 Colocação e transporte do betão

Definida a mistura passou-se à colocação e espalhamento do betão. Esta colocação do BCC consiste na descarga directa da mistura transportada cuidadosamente no local de obra, evitando a segregação do betão (Marques, 2008).

Aquando da colocação e transporte do betão em obra, figura 2.24, devem ser seguidas certas regras de segurança, das quais se podem destacar as seguintes:

- organizar a frente de trabalho para que não haja interferência entre os diversos trabalhos a serem executados;
- não permitir a circulação quer de pessoas quer de equipamentos durante a execução, salvo em casos excepcionais. Todos os equipamentos que entram na construção devem ser previamente lavados;
- altura de queda do betão não deve exceder os 60 cm e a mistura deve ser colocada sobre o material fresco espalhado da camada em execução e não sobre a camada inferior;
- a espessura final da camada deve ser a espessura teórica de 0.30 m;
- a colocação das chapas das juntas transversais deve ser feita imediatamente depois de concluída a compactação;
- a vibração do betão deve ser efectuada de modo uniforme e sistemático assim que possível, após o espalhamento.



Figura 2.24 – Transporte do betão através de telas transportadoras e sua colocação.

2.5.3 Espalhamento e compactação

Após a colocação de cada camada de betão faz-se o seu espalhamento. No caso da barragem de Pedrógão o mesmo foi efectuado no sentido longitudinal em troços de 5 m de largura e com avanços de 30 m de comprimento (3 troços \approx 100 m comprimento e 30 m de largura), figura 2.25. O volume colocado em cada troço é de aproximadamente 45 m^3 ($30 \times 5 \times 0,3$) e com duração de cerca de 15 minutos.

A sequência de avanço em cada camada deve ser sempre a mesma, com especial atenção para que os topos de cada troço não coincidam dentro da mesma camada ou em troços sucessivos.

A distância mínima entre os topos dos troços de avanço adjacentes deve ser de 3 metros.

Os topos de avanço de cada troço devem acabar com uma rampa compactada. No caso de se produzir uma junta de betonagem no topo de avance essa rampa deverá ser cortada segundo um talude semi-vertical deixando uma espessura mínima da camada de 20 cm.

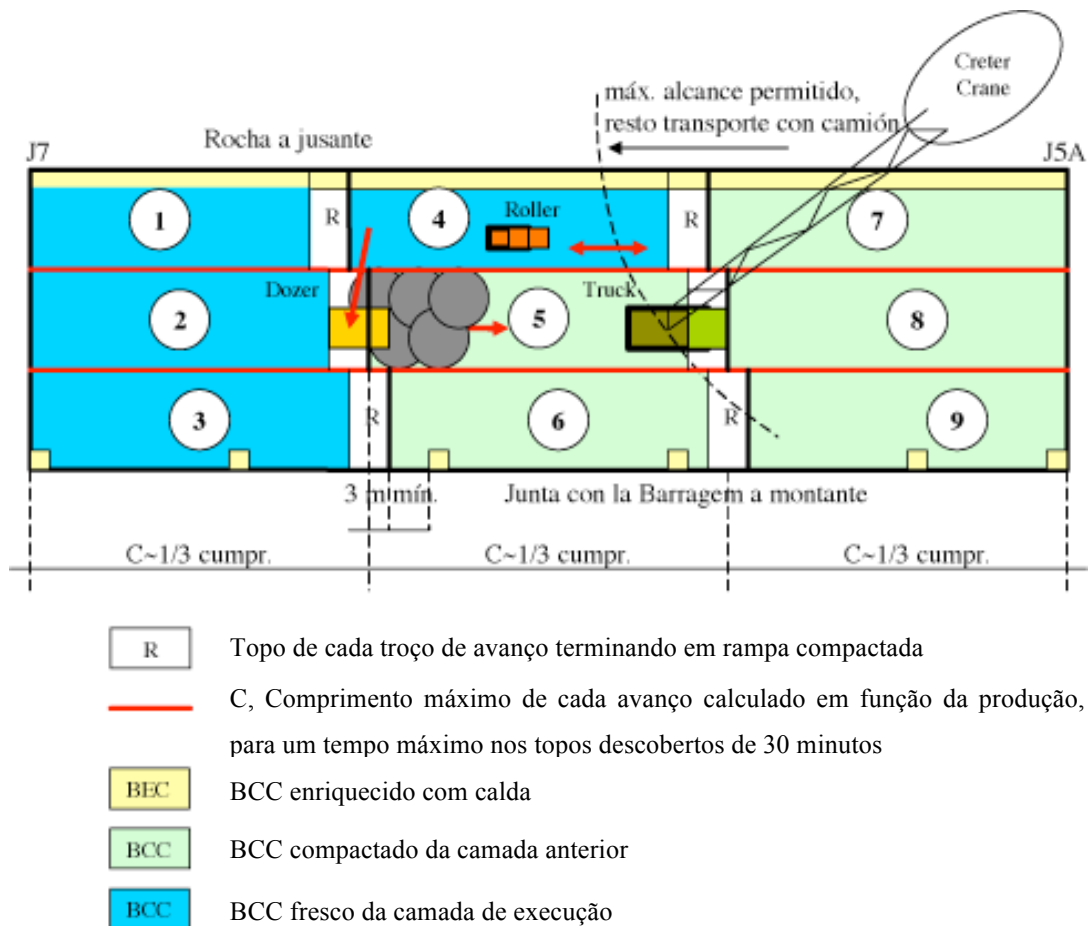


Figura 2.25 - Método de colocação e espalhamento do BCC (Adaptado de ORTEGA *et al*, 2003).

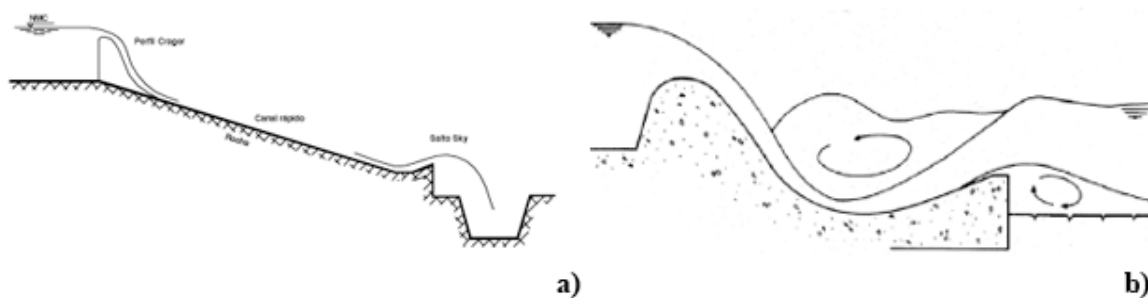
2.5.4 Órgãos anexos

De referir que, tal como em outras barragens, esta também tem os seus órgãos anexos, sendo eles:

- descarregador de superfície;
- descarregador de fundo;
- tomada de água;
- central hidroeléctrica.

Os órgãos anexos da barragem foram todos construídos em betão convencional, visto que o espaço disponível era reduzido e, como foi referido anteriormente, para a construção em BCC seria necessária uma área mais ampla.

Relativamente aos descarregadores, figura 2.26, são órgãos que regulam a altura máxima que a coluna de água pode atingir por forma a impedir o galgamento do paramento da barragem. Os descarregadores podem ser de fundo “*Salto de Sky*”(localizado na parte inferior do paramento) e de superfície “*Roller Bucket*” (evacuador de cheias). Estes órgãos podem criar alguns problemas geotécnicos tais como instabilidade de taludes, erosão a jusante, subpressões, permeabilidade.



a) Salto de Sky; b) Roller Bucket.

Figura 2.26 – Descarregadores (COSTA, T., 2011).

As tomadas de água são estruturas que permitem regular o embalse a diferentes alturas. O número de tomadas de água e a sua capacidade dependem do volume armazenado, dos serviços que haja para abastecer e da profundidade da água. Relativamente aos problemas que podem ser criados pelas tomadas de água, estes prendem-se com a estabilidade da escavação, permeabilidade e estado de tensão (Tamada, 1994).

A central hidroelétrica, figura 2.27, serve para produzir energia através do bombeamento de caudais nas horas em que a actividade na obra é menor, para que possa ser armazenada energia suficiente para se poder dispender quando a actividade na mesma for maior. Alguns dos problemas que podem ocorrer neste tipo de estruturas relacionam-se com a deformabilidade das fundações, estabilidade dos maciços de fundação e subpressões.



Figura 2.27 – Central hidroelétrica da barragem do Pedrógão.

2.6 Juntas

Ao iniciar a execução de uma barragem com BCC, as camadas deste são dispostas sobre camadas de agregados, sendo o seu tempo de exposição às condições atmosféricas reduzido, para que a camada a sobrepor de BCC consiga uma boa ligação à camada de agregados subjacente. A estas ligações existentes entre duas camadas de BCC consecutivas, dá-se o nome de juntas (Ortega, 1998), podendo estas ser juntas horizontais de construção, figura 2.28, ou juntas verticais de contracção, sendo estas secções de descontinuidades alvo principal do ensaio com recurso à máquina de Hoek.

As juntas horizontais podem ser subdivididas em juntas horizontais quentes e juntas horizontais frias. As juntas horizontais quentes são aquelas que não necessitam de pré-tratamento, apenas tem de se garantir a limpeza da superfície já compactada, sendo o betão colocado de forma contínua antes da camada anterior ganhar presa. Por outro lado, dá-se o surgimento de juntas frias quando o tempo de colocação entre camadas consecutivas de BCC é superior a quatro horas (Sagrado, 2008).

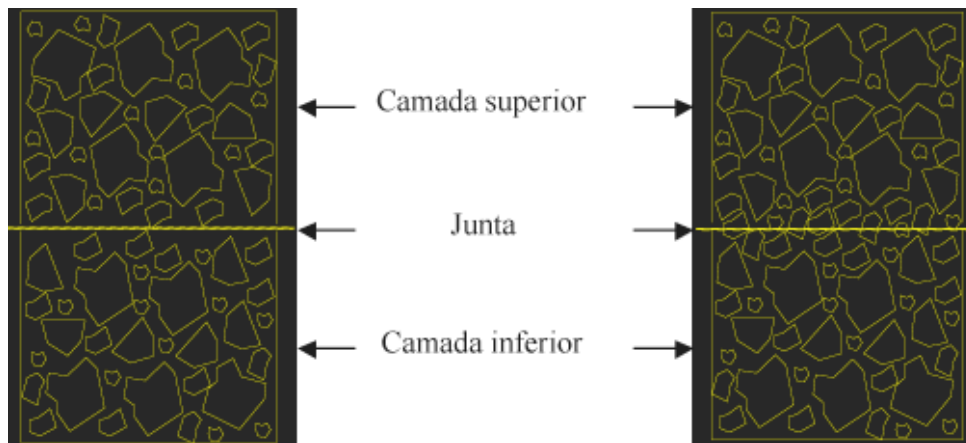


Figura 2.28 - Juntas horizontais (Santana, 2000).

Relativamente às juntas verticais de contracção, são superfícies de descontinuidade, com geometria e localização definidas no projecto, dividindo assim o corpo da barragem em blocos, por forma a minimizar a retracção do betão devido à libertação do calor aquando da hidratação e conferindo capacidade de suportar deslocamentos sem que ocorram rupturas resultantes da alteração do perfil de escavação. Através das juntas de contracção, pode também ser assegurada a impenetrabilidade da estrutura, efectuando um corte sobre a superfície de BCC já compactada através da colocação de uma chapa metálica, plástica ou de outro material qualquer que interrompa a continuidade das camadas de grande extensão, através de um equipamento vibratório (US Army, 2000), figura 2.29.



Figura 2.29 - Colocação de juntas verticais (Marques, 2008).

2.7 Outro método de colocação do BCC – método “rampado”

Como alternativa à colocação do BCC convencional, aparece uma outra técnica, lançada em 1999 por empresas chinesas, que consiste na colocação do betão pelo método “rampado” (termo utilizado pelos brasileiros), e que já foi utilizado inicialmente na barragem de Jiangya (1997 – 1999) e na barragem de Lajeado (Brasil) em 2001, figura 2.28.

Esta técnica consiste na execução de camadas com altura entre os 0,30 e os 0,35 m, dispostas com uma inclinação que pode variar entre os 7 a 10% (rampa), resultando daí um tempo de exposição pequeno (aproximadamente 4 horas), dispensando por isso uma argamassa de ligação entre camadas (Batista *et al.*, 2002).

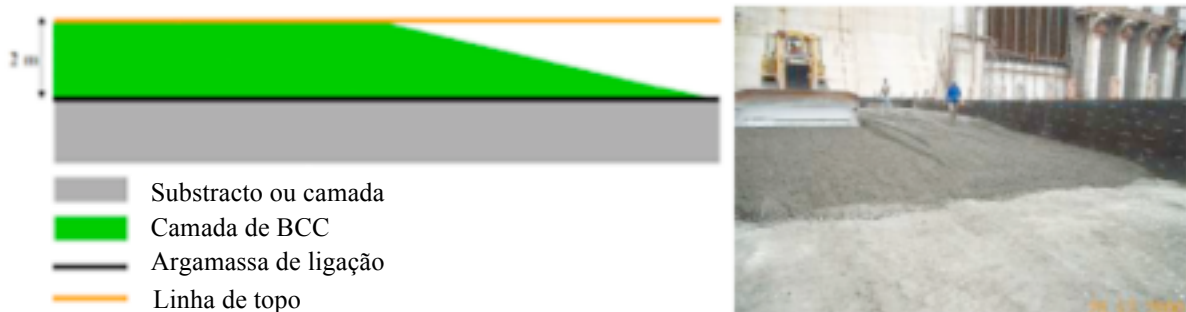


Figura 2.28 – Esquema de colocação do BCC segundo o método “rampado” na barragem do Lajeado (Adaptado de Batista *et al.*, 2002).

Este método apresenta também algumas vantagens relativamente à colocação e utilização do BCC ou mesmo do Betão convencional, como por exemplo:

- ligação entre camadas de betão compactado com cilindros com homogeneidade e consistência;
- redução do número de camadas;
- estrutura mais firme, com maior segurança global;
- redução no trabalho de limpeza, tratamento e aplicação da argamassa de ligação;
- limitação do número de juntas frias;
- menor possibilidade da água e de impurezas resultantes da limpeza invadirem a área de lançamento em andamento;

- redução da área de exposição do BCC recém executado que poderia ser danificado pela acção da chuva ou condições agressivas de temperatura e, em consequência disso, redução do volume de BCC que pode requerer remoção ou substituição;
- aumento das taxas de lançamento global de BCC.

Por oposição, as limitações desta técnica são:

- opções da forma do paramento de jusante limitadas à utilização de degraus altos (igual à altura do degrau) ou uso de blocos de betão pre-moldado;
- necessidade de cuidados especiais na base da camada inclinada, assegurando que se verifiquem pequenas irregularidades nas quais o agregado poderá ficar esmagado debaixo do cilindro compactador, provocando assim um caminho preferencial de percolação;
- acabamento da superfície externa do degrau de jusante com betão torna-se mais difícil.

Capítulo III

Execução de BCC

3.1 Generalidades

Neste capítulo apresentam-se os materiais utilizados na execução de barragens com betão compactado com cilindros, o fabrico da mistura, alguns ensaios e propriedades dos agregados. Por último, descrevem-se os ensaios laboratoriais de granulometria e baridade dos agregados utilizados, assim como o ensaio de compactação Proctor pesado (com recurso ao martelo vibratório Kango), e ulterior preparação dos provetes da mistura de BCC a serem submetidos a ensaios laboratoriais de compressão uniaxial e deslizamento das juntas com recurso á máquina de Hoek.

3.2 Materiais de construção do betão compactado com cilindros

3.2.1 Agregados

A designação de agregados é “recente”, visto que anteriormente estes materiais eram designados por “inertes”. De dimensões regra geral variáveis, estas partículas de rocha formam a parte pétrea das misturas de betão, conferindo bom desempenho a nível estrutural e benefícios a nível económico (Carvalho, 2009).

Para a selecção dos agregados que irão constituir a mistura de BCC deve atender-se à localização da obra a executar, à quantidade de material disponível nas proximidades e a factores que se prendem com as características de durabilidade, permeabilidade e resistência, necessárias para o bom desempenho da obra durante o seu período de vida útil. Os agregados utilizados no BCC são agregados grossos, areias, e fillers podendo estes últimos entrar na mistura em diferentes quantidades. Podem ser classificados segundo as suas dimensões, modo de obtenção, baridade e massa volúmica, podendo também ser classificados pelas características de ligação ao ligante, grau de absorção de água e resistência, propriedades estas que são obtidas laboratorialmente (Coutinho, 1994).

No que respeita à fracção grossa na selecção do material a ser utilizado na mistura terá de se ter em atenção a sua preponderância relativamente ao índice de vazios (e) e a potencial

segregação da mistura. Estes agregados não devem ter dimensões superiores a 75 mm, visto poderem aumentar o potencial de segregação e o número de vazios que são preenchidos com pasta, dificultam a obtenção de um grau de compactação adequado e são economicamente menos vantajosos.

Relativamente à selecção dos agregados finos e fillers, são todas as partículas que passam no peneiro #200 (ASTM), quer sejam de natureza argilosa, quer calcária quando são provenientes da britagem da rocha.

3.2.2 Ligante

Relativamente ao tipo de ligante para a realização de um BCC, este pode ser de vários tipos, sendo o cimento de Portland o mais utilizado. Outros tipos de ligantes podem combinar-se como substitutos, fraccionados, do cimento de Portland por forma e tornar o betão economicamente rentável. Estes substitutos são, na maioria dos casos, pozolanas, escórias de alto-forno e cinzas volantes (ACI, 1999).

No caso de barragens de BCC, o tipo de cimento mais aplicado é o cimento de Portland tipo IV, também denominado cimento pozolânico, CEM IV/A 32,5R (NP EN 197-1:2000), sendo a sua composição a seguinte:

- 65% a 89% de clínquer Portland;
- 11% a 35% de cinzas volantes¹;
- 0% a 5% de outros constituintes.

Este cimento é utilizado no fabrico de argamassas e betões devido à sua elevada resistência química e baixo calor de hidratação, e é aplicado em obras duradouras. As suas principais aplicações são, segundo a ficha técnica da SECIL:

- betões para pavimentos rodoviários;
- túneis e fundações directas e indirectas;

¹ Adições – material finamente dividido, utilizado no betão com a finalidade de lhe melhorar certas propriedades ou alcançar propriedades especiais, NP EN 206; 2007.

- pavimentos industriais e superfícies sujeitas a ataques químicos;
- obras de betão como barragens, reforço de encontros, entre outras;
- obras efectuadas em ambientes marinhos.

3.2.3 Água

A água utilizada no fabrico deste tipo de betão terá de ser potável, ou inodoro e sem gosto. No caso da utilização de águas “suspeitas”, estas devem ser analisadas laboratorialmente, prevenindo uma utilização prejudicial à compactação e, principalmente, à hidratação do cimento na mistura (Coutinho, 1994).

Em qualquer mistura de BCC procura-se utilizar uma máxima quantidade de agregados e uma quantidade de água mínima de forma a reduzir o material cimentício bem como reduzir o seu volume (ACI. 1999).

3.2.4 Adjuvantes

Os adjuvantes são definidos como sendo uma “...substância utilizada em percentagem inferior a 5% da massa do cimento, adicionada durante a amassadura, aos componentes normais das argamassas e betões, com o fim de modificar certas propriedades destes materiais...” (Coutinho, 1994). Na tabela 3.1, apresentam-se os adjuvantes que modificam a reologia dos betões.

Tabela 3.1 – Tipos de adjuvantes que alteram a reologia dos betões (Coutinho, 1994).

Ajuvantes	Características
Redutores de água de amassadura (plastificantes)	Permitem melhorar a trabalhabilidade para determinada relação de água/cimento; Permitem com a mesma trabalhabilidade reduzir a dosagem de água na amassadura.
Superplastificantes e fluidificantes	Para a obtenção de betões fluidos de consistência muito plástica com reduzidas relações água/cimento.

Tabela 3.1 (Continuação) - Tipos de adjuvantes que alteram a reologia dos betões (Coutinho, 1994).

Ajuvantes	Características
Introdutores de ar	<p>Introduzem no betão inúmeras pequenas bolhas de ar em quantidades controladas, que melhoram a reologia do betão;</p> <p>Normalmente indicados na pré-fabricação por meio de extrusão ou para aumentar a resistência ao gelo/degelo;</p> <p>A sobredosagem deste produto pode ser particularmente danosa, pois as resistências finais podem ser gravemente afectadas</p>
Aceleradores e retardadores de presa	<p>Aceleradores – permitem acelerar as reações de hidratação do cimento, favorecendo as resistências iniciais, especialmente em tempo frio;</p> <p>Retardadores – retardam as reações de hidratação do cimento o que poderá facilitar o transporte prolongado ou, em caso de ser, preverem demoras na aplicação do betão. Facilitam as betonagens em condições de temperaturas mais elevadas. Na maioria dos casos reduzem as resistências iniciais, sem alterar as resistências a médio prazo.</p>
Hidrófugos	Melhoram o comportamento na presença de água

A introdução destes adjuvantes acima referidos melhoram a trabalhabilidade pelo facto de reduzir a quantidade de água requerida pela mistura (US Army, 2000).

3.3 Preparação da Mistura

Tal como o betão convencional, também o betão compactado com cilindros, segundo a norma NP EN 206;2007, “...é uma mistura de cimento, agregados grossos e finos e água com ou sem incorporação de adjuvantes ou adições, que desenvolve as suas propriedades por hidratação do cimento.”.

Aquando da saída do betão do equipamento adequado para o efeito, o mesmo deve ser devidamente misturado de forma a não haver efeito de segregação. Essa mistura dos agregados é efectuada por misturadoras que podem ser contínuas, figura 3.1-a, ou misturadoras de tambor, figura. 3.1-b. Comparando ambos os tipos, pode dizer-se que as misturadoras de tambor têm a capacidade de produzir maiores quantidades de betão e misturas

mais uniformes. O fabrico desta mistura deve revelar uma boa qualidade e proporcionar uma taxa de produtividade elevada, suprimindo assim as necessidades de colocação do betão na obra (Andrade 2008).

Segundo ACI, 1999 e US Army, 2000 as taxas de produção de um betão compactado com cilindros varia consoante a dimensão do projecto ou obra em questão. Assim sendo, para pequenas obras a taxa de fabrico aproxima-se dos 76 m^3 , para obras de média dimensão entre 190 e 380 m^3 e, por fim, para grandes obras varia de 570 a 760 m^3 .



a) Misturadora contínua “Pugmill”; (b) Misturadora de tambor.

Figura 3.1 – Misturadoras (Pugmil Systems, Inc. 2011).

3.4 Propriedades da Mistura

A mistura resulta da junção dos materiais constituintes do betão compactado com cilindros, devendo dar-se mais importância a certas propriedades porque são estas que irão influenciar o transporte, a colocação e as propriedades que o betão irá adquirir depois de endurecido. Tais propriedades são a massa volúmica, a quantidade de água na mistura à saída da misturadora, trabalhabilidade e calor gerado.

3.4.1 Massa Volúmica

A massa volúmica é, como o próprio nome indica, uma relação entre a massa total de material (gr) e o seu volume (cm^3).

Esta propriedade da mistura de BCC depende principalmente das massas volúmicas dos materiais constituintes, sendo eles agregados (britas e areia), ligante (cimento) ou água.

Comparativamente ao betão convencional com o mesmo tipo de agregados utilizados no BCC, a massa volúmica deste último é superior em cerca de 1 a 3%, devido a uma mais elevada quantidade de água e maior energia de compactação. Mas esses valores de massas volúmicas podem ser iguais no caso de o BCC ser constituído por uma quantidade considerável de material pozolânico ou de água ou então por um filler de baixa massa volúmica. Alguns exemplos de valores de massas volúmicas de BCC no mundo são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Massa volúmica de misturas em algumas barragens no Mundo (Andriolo, 1989).

Projecto / Obra	Massa Volúmica (kg.m ⁻³)
Itaipu (Brasil)	2,62
Saco de Nova Olinda (Brasil)	2,36
Shimajigawa (Japão)	2,46
Ohkawa (Japão)	2,30
Sakaigawa (Japão)	2,54
Upper Stillwater (EUA)	2,40
Santa Efigenia (Espanha)	2,37

3.4.2 Quantidade de água na mistura à saída da misturadora

A água é um constituinte importante na mistura, actuando como lubrificante aquando da sua compactação, facilitando, assim, o rearranjo das partículas durante a vibração.

No que respeita à quantidade de água, esta tem uma relação de proporcionalidade inversa com resistência da mistura, ou seja, quanto menor a quantidade de água utilizada na mistura maior será a resistência da mesma. A água deve permitir que a mistura realizada desencadeie as reacções de hidratação do cimento, garantindo a sua uniformidade e aparente homogeneidade, e com uma consistência tal que suporte o movimento dos equipamentos utilizados na obra.

3.4.3 Trabalhabilidade

A propriedade que determina a capacidade de um betão ser colocado e compactado sem segregação prejudicial, denomina-se trabalhabilidade. Esta propriedade é caracterizada por

quantidade de cimento, adições minerais, presença de substâncias químicas, quantidade de água, dimensão e qualidade dos agregados (US Army, 2000).

3.4.4 Calor Gerado

No fabrico de uma mistura de betão convencional a principal fonte produtora de calor é a resultante da hidratação do cimento aquando da adição do cimento com a água, tornando esta mistura susceptível de sofrer roturas na sua estrutura (Coutinho, 1994).

No caso do BCC, o calor gerado é menor do que no betão convencional. Tal se deve a uma menor quantidade de cimento utilizada na mistura. Com a diminuição da quantidade de cimento na mistura, esta dosagem é substituída por quantidades equivalentes de pozolanas ou escórias com características de resistência, de economia e de exigências de construção tais, de modo a compensar essa mesma diminuição do cimento. O calor gerado é reduzido devido à utilização de uma quantidade de cimento na mistura (US Army, 2000).

3.5 Parte experimental

Em seguida será descrita a preparação de provetes de uma mistura de BCC que se pretendia estudar, caracterizando-a do ponto de vista das fracções granulométricas utilizadas, do respectivo peso volúmico, bem como do procedimento adoptado para a sua compactação.

Esta metodologia visava a obtenção de um conjunto de provetes cúbicos, preliminares, de grandes dimensões ($60 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$), também exposta adiante, a partir dos quais se obtiveram dois subconjuntos de provetes:

- por caroteamento, provetes cilíndricos para ensaiar numa máquina de Hoek e avaliar a resistência ao deslizamento das juntas de compactação desenvolvidas durante a preparação prévia dos provetes cúbicos;
- por serragem, provetes cúbicos de 15 cm de aresta para submeter a ensaios de compressão uniaxial.

Os agregados utilizados nesta experiência foram filler calcário, areia de rio e cimento (CEM IV) gentilmente cedidos pela SECIL, brita grossa fornecida pela QUIMIPEDRA e britas fina e média disponibilizadas pelo Departamento de Engenharia Civil (DEC) da FCT/UNL.

3.5.1 Granulometria dos agregados

Antes de se iniciar a mistura dos agregados juntamente com o ligante, procedeu-se a uma análise granulométrica da areia e britas utilizadas. A granulometria dos agregados é a propriedade mais importante, precedida da resistência mecânica, pois condiciona a compactidade (C) do betão bem como, ulteriormente, todas as suas restantes propriedades. Corresponde a uma distribuição das percentagens das partículas constituintes dos agregados, obtida por crivagem do material numa bateria de peneiros. Esta propriedade é definida pela abertura da malha, normalmente quadrada, do crivo através do qual o material passa, ficando retido num peneiro de abertura inferior (Coutinho, 1994), figura 3.2.

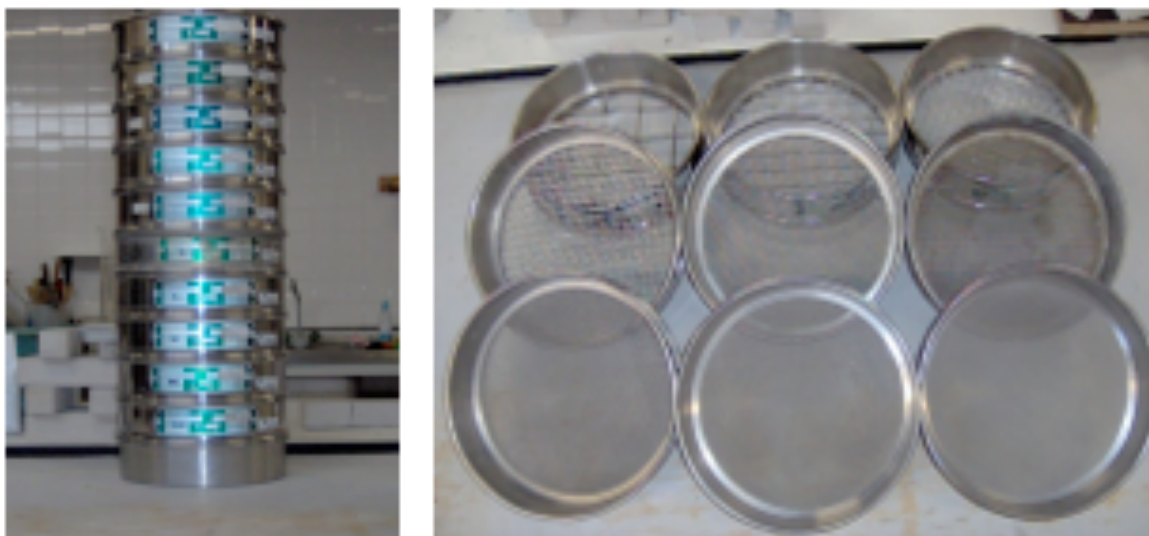


Figura 3.2 - Peneiros ASTM utilizados e respectivas aberturas das malhas.

Para a execução desta análise segundo NP-1379; 1976, existem vários peneiros de diferentes aberturas (malhas) constituindo as três séries geométricas (principal, secundária e complementar) de peneiros, tabela 3.3. Numa análise granulométrica de agregados, utilizam-se peneiros ASTM (*American Society for Testing and Materials*) cujas malhas formam uma série geométrica de razão 2 (à medida que passa para o peneiro inferior a relação entre as malhas reduz-se a metade), começando no peneiro de abertura 0,075 mm (Coutinho, 1994).

Tabela 3.3 - Número dos peneiros, aberturas e séries granulométricas (Pinho, F., 2006).

Peneiros	Malha (mm)	Séries granulométricas		
		Principal	Secundária	Complementar
1" ½	38,1	•		
1"	25,4		•	
¾"	19,1	•		
½"	12,7		•	
⅜"	9,52	•		
4	4,76	•		
8	2,38	•		
16	1,19	•		
30	0,595	•		
40	0,425			•
50	0,297	•		
70	0,212			•
100	0,149	•		
120	0,125			•
170	0,090			•
200	0,075	•		

O ensaio de análise granulométrica do filler calcário foi realizado na SECIL. Por se tratar de um ensaio em material muito fino, esta análise é feita com a ajuda de um laser, denominando-se o ensaio de “análise granulométrica a laser”.

Efectuou-se (Anexo I) a análise granulométrica dos agregados mais grosseiros utilizados para o fabrico da mistura (areia de rio, brita fina, brita média e brita grossa), com recurso à série principal de peneiros ASTM, tabela 3.3. Cada ensaio foi realizado em três fases, ou seja, para a definição de cada curva granulométrica dividiu-se a amostra inicial em três fracções iguais, resultando a curva final da média das amostras de cada agregado.

O material foi pesado na balança digital, graduada em gramas e erro de $\pm 0,1\%$, e colocado na estufa a uma temperatura de 60 °C durante 24 horas. Seguidamente, foi retirado e separado em três fracções iguais e peneirado através da referida série de peneiros. Por fim pesou-se o material retido em cada peneiro, traçou-se a curva granulométrica e calculou-se o módulo de finura.

Nas tabelas 3.4 a 3.19 e figuras 3.3 a 3.6 apresentam-se os resultados obtidos.

Tabela 3.4 - Resumo da granulometria da areia de rio (amostra 1).

Peneiro	Malha (mm)	Areia de Rio 1			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,3				
3/4"	19,1				
1/2"	12,7				
3/8"	9,51	0,00	0,00	100,00	0,00
nº 4	4,76	0,90	0,06	99,94	0,06
nº 8	2,38	12,60	0,84	99,10	0,90
nº 16	1,19	140,50	9,37	89,73	10,27
nº 30	0,595	510,20	34,03	55,69	44,31
nº 50	0,297	579,40	38,65	17,04	82,96
nº 100	0,149	184,10	12,28	4,76	95,24
nº 200	0,075	58,60	3,91	0,85	99,15
Refugo	-	12,80	0,85	0,00	100,00
Totais		1499,10	100,00		
Módulo de finura:		-			2,34

Tabela 3.5 - Resumo da granulometria da areia de rio (amostra 2).

Peneiro	Malha (mm)	Areia de Rio 2			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,3				
3/4"	19,1				
1/2"	12,7				
3/8"	9,51				
nº 4	4,76	0,00	0,00	100,00	0,00
nº 8	2,38	13,30	0,89	99,11	0,89
nº 16	1,19	144,55	9,64	89,48	10,52
nº 30	0,595	529,30	35,29	54,19	45,81
nº 50	0,297	568,75	37,92	16,27	83,73
nº 100	0,149	176,50	11,77	4,50	95,50
nº 200	0,075	56,20	3,75	0,75	99,25
Refugo	-	11,30	0,75	0,00	100,00
Totais		1499,90	100,00		
Módulo de finura:					2,36

Tabela 3.6 - Resumo da granulometria da areia de rio (amostra 3).

Peneiro	Malha (mm)	Areia de Rio 3			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,3				
3/4"	19,1				
1/2"	12,7				
3/8"	9,51	0,00	0,00	100,00	0,00
nº 4	4,76	0,35	0,02	99,98	0,02
nº 8	2,38	13,10	0,87	99,10	0,90
nº 16	1,19	141,53	9,44	89,67	10,33
nº 30	0,595	517,75	34,53	55,14	44,86
nº 50	0,297	580,10	38,68	16,45	83,55
nº 100	0,149	174,30	11,62	4,83	95,17
nº 200	0,075	59,40	3,96	0,87	99,13
Refugo	-	13,05	0,87	0,00	100,00
Totais		1499,58	100,00		
Módulo de finura:					2.35

Tabela 3.7 – Análise granulométrica da areia de rio (valores médios).

Peneiro	Malha (mm)	Areia de Rio (média)			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,3				
3/4"	19,1				
1/2"	12,7				
3/8"	9,51	0,00	0,00	100,00	0,00
nº 4	4,76	0,42	0,03	99,97	0,03
nº 8	2,38	13,00	0,87	99,11	0,89
nº 16	1,19	142,19	9,48	89,62	10,38
nº 30	0,595	519,08	34,62	55,01	44,99
nº 50	0,297	576,08	38,42	16,59	83,41
nº 100	0,149	178,30	11,89	4,70	95,30
nº 200	0,075	58,07	3,87	0,83	99,17
Refugo	-	12,38	0,83	0,00	100,00
Totais		1499,53	100,00		
Módulo de finura:					2.35

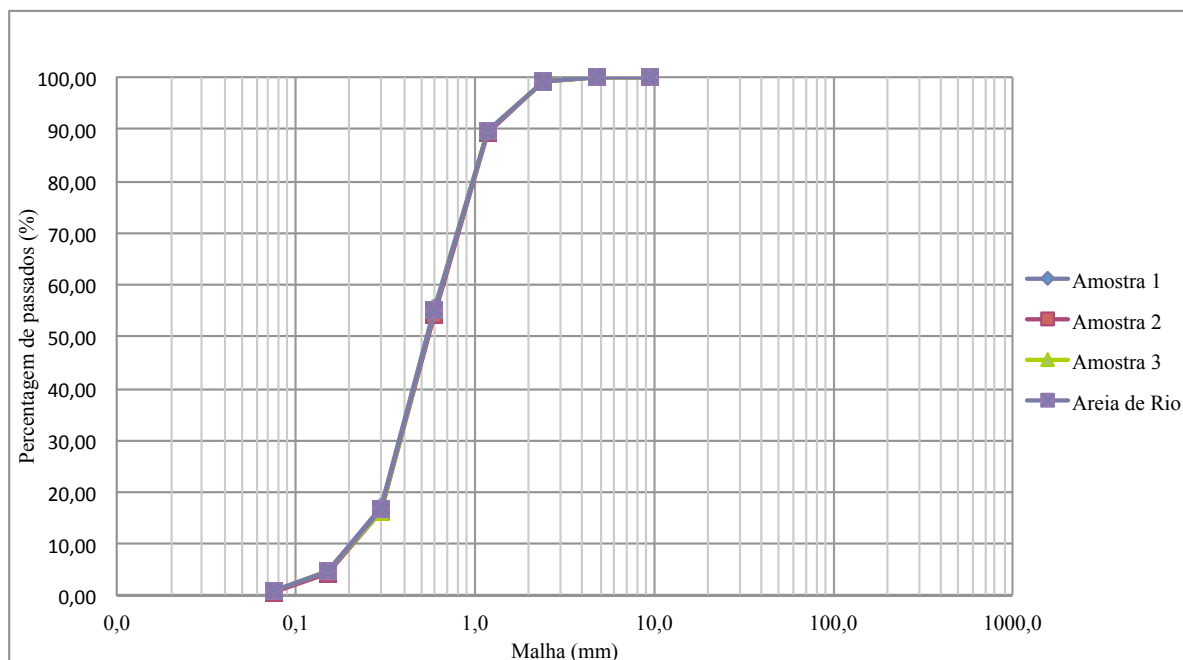


Figura 3.3 - Curvas granulométricas das três amostras de areia de rio e respectivo valor médio.

Tabela 3.8 – Resumo da granulometria da brita fina (amostra 1).

Peneiro	Malha (mm)	Brita fina 1			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,3				
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,00	0,00
1/2"	12,7	6,10	0,41	99,59	0,41
3/8"	9,51	291,00	19,40	80,19	19,81
nº 4	4,76	1039,90	69,34	10,85	89,15
nº 8	2,38	158,80	10,59	0,27	99,73
nº 16	1,19	1,90	0,13	0,14	99,86
nº 30	0,595	0,30	0,02	0,12	99,88
nº 50	0,297	0,40	0,03	0,09	99,91
nº 100	0,149	0,80	0,05	0,04	99,96
nº 200	0,075	0,30	0,02	0,02	99,98
Refugo	-	0,30	0,02	0,00	100,00
Totais		1499,80	100,00		
Módulo de finura:					6,08

Tabela 3.9 – Resumo da granulometria da brita fina (amostra 2).

Peneiro	Malha (mm)	Brita fina 2			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,3				
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,00	0,00
1/2"	12,7	61,10	4,07	95,93	4,07
3/8"	9,51	386,90	25,80	70,12	29,88
nº 4	4,76	969,30	64,65	5,48	94,52
nº 8	2,38	78,80	5,26	0,22	99,78
nº 16	1,19	0,90	0,06	0,16	99,84
nº 30	0,595	0,60	0,04	0,12	99,88
nº 50	0,297	0,40	0,03	0,09	99,91
nº 100	0,149	0,90	0,06	0,03	99,97
nº 200	0,075	0,40	0,03	0,01	99,99
Refugo	-	0,10	0,01	0,00	100,00
Totais		1499,40	100,00		
Módulo de finura:					6,24

Tabela 3.10 – Resumo da granulometria da brita fina (amostra 3).

Peneiro	Malha (mm)	Brita fina 3			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,3				
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,00	0,00
1/2"	12,7	56,80	3,79	96,21	3,79
3/8"	9,51	314,60	20,98	75,23	24,77
nº 4	4,76	1027,30	68,50	6,73	93,27
nº 8	2,38	98,60	6,58	0,15	99,85
nº 16	1,19	0,60	0,04	0,11	99,89
nº 30	0,595	0,10	0,01	0,11	99,89
nº 50	0,297	0,20	0,01	0,09	99,91
nº 100	0,149	0,90	0,06	0,03	99,97
nº 200	0,075	0,40	0,03	0,01	99,99
Refugo	-	0,10	0,01	0,00	100,00
Totais		1499,40	100,00		
Módulo de finura:					6.24

Tabela 3.11 – Análise granulométrica da brita fina (valores médios).

Peneiro	Malha (mm)	Brita fina (média)			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,3				
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,00	0,00
1/2"	12,7	41,33	2,76	97,24	2,76
3/8"	9,51	330,83	22,06	75,18	24,82
nº 4	4,76	1012,17	67,50	7,69	92,31
nº 8	2,38	112,07	7,47	0,21	99,79
nº 16	1,19	1,13	0,08	0,14	99,86
nº 30	0,595	0,33	0,02	0,12	99,88
nº 50	0,297	0,33	0,02	0,09	99,91
nº 100	0,149	0,87	0,06	0,04	99,96
nº 200	0,075	0,37	0,02	0,01	99,99
Refugo	-	0,17	0,01	0,00	100,00
Totais		1499,60	100,00		
Módulo de finura:					6,18

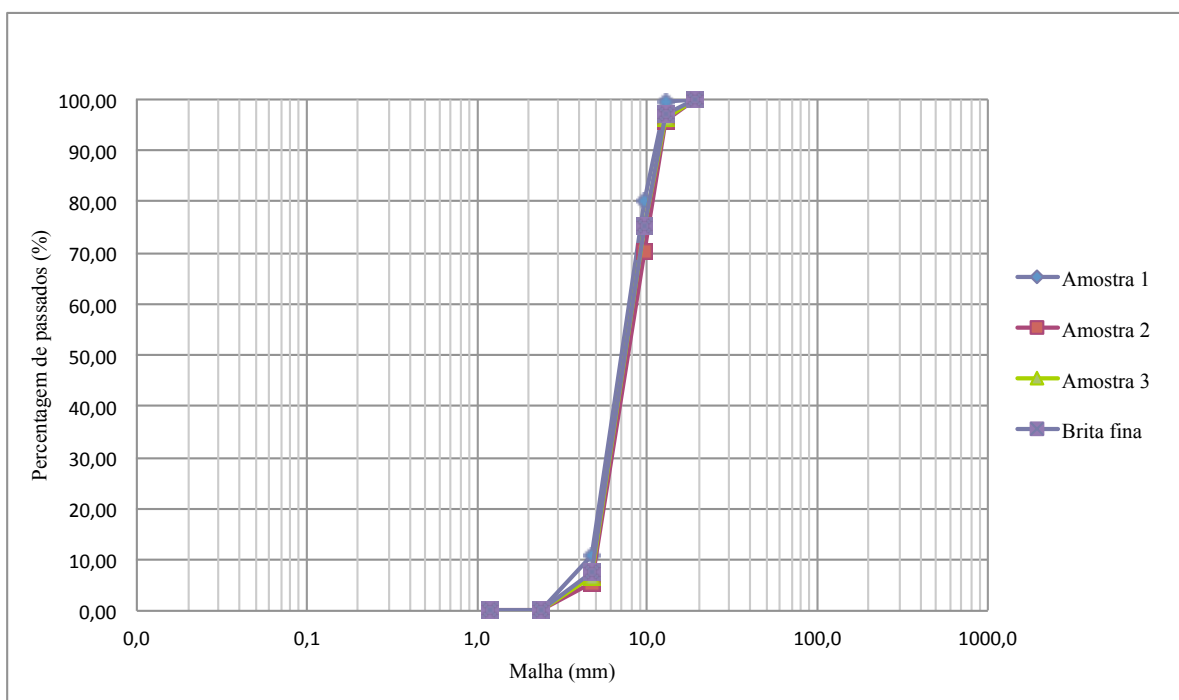


Figura 3.4 - Curvas granulométricas das três amostras de brita fina e respectivo valor médio.

Tabela 3.12 – Resumo da granulometria da brita média (amostra 1).

Peneiro	Malha (mm)	Brita média 1			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,3	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,1	217,60	14,51	85,49	14,51
1/2"	12,7	906,30	60,43	25,06	74,94
3/8"	9,51	316,50	21,10	3,96	96,04
nº 4	4,76	58,40	3,89	0,07	99,93
nº 8	2,38	0,30	0,02	0,05	99,95
nº 16	1,19	0,00	0,00	0,05	99,95
nº 30	0,595	0,00	0,00	0,05	99,95
nº 50	0,297	0,40	0,03	0,02	99,98
nº 100	0,149	0,20	0,01	0,01	99,99
nº 200	0,075	0,00	0,00	0,01	99,99
Refugo	-	0,10	0,01	0,00	100,00
Totais		1499,80	100,00		
Módulo de finura:					7,10

Tabela 3.13 – Resumo da granulometria da brita média (amostra 2).

Peneiro	Malha (mm)	Brita média 2			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,3	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,1	377,50	25,17	74,83	25,17
1/2"	12,7	927,90	61,87	12,96	87,04
3/8"	9,51	176,80	11,79	1,17	98,83
nº 4	4,76	17,00	1,13	0,04	99,96
nº 8	2,38	0,10	0,01	0,03	99,97
nº 16	1,19	0,00	0,00	0,03	99,97
nº 30	0,595	0,20	0,01	0,02	99,98
nº 50	0,297	0,10	0,01	0,01	99,99
nº 100	0,149	0,10	0,01	0,01	99,99
nº 200	0,075	0,10	0,01	0,00	100,00
Refugo	-	0,00	0,00	0,00	100,00
Totais		1499,80	100,00		
Módulo de finura:					7,24

Tabela 3.14 – Resumo da granulometria da brita média (amostra 3).

Peneiro	Malha (mm)	Brita média 3			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,3	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,1	146,10	9,74	90,26	9,74
1/2"	12,7	871,00	58,07	32,18	67,82
3/8"	9,51	426,30	28,42	3,76	96,24
nº 4	4,76	55,70	3,71	0,05	99,95
nº 8	2,38	0,30	0,02	0,03	99,97
nº 16	1,19	0,00	0,00	0,03	99,97
nº 30	0,595	0,00	0,00	0,03	99,97
nº 50	0,297	0,20	0,01	0,01	99,99
nº 100	0,149	0,00	0,00	0,01	99,99
nº 200	0,075	0,10	0,01	0,01	99,99
Refugo	-	0,10	0,01	0,00	100,00
Totais		1499,80	100,00		
Módulo de finura:					7,06

Tabela 3.15 – Análise granulométrica da brita média (valores médios).

Peneiro	Malha (mm)	Brita média (média)			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,3	0,00	0,00	100,00	0,00
3/4"	19,1	247,07	16,47	83,53	16,47
1/2"	12,7	901,73	60,12	23,40	76,60
3/8"	9,51	306,53	20,44	2,96	97,04
nº 4	4,76	43,70	2,91	0,05	99,95
nº 8	2,38	0,23	0,02	0,04	99,96
nº 16	1,19	0,00	0,00	0,04	99,96
nº 30	0,595	0,07	0,00	0,03	99,97
nº 50	0,297	0,23	0,02	0,02	99,98
nº 100	0,149	0,10	0,01	0,01	99,99
nº 200	0,075	0,07	0,00	0,00	100,00
Refugo	-	0,07	0,00	0,00	100,00
Totais		1499,80	100,00		
Módulo de finura:					7,13

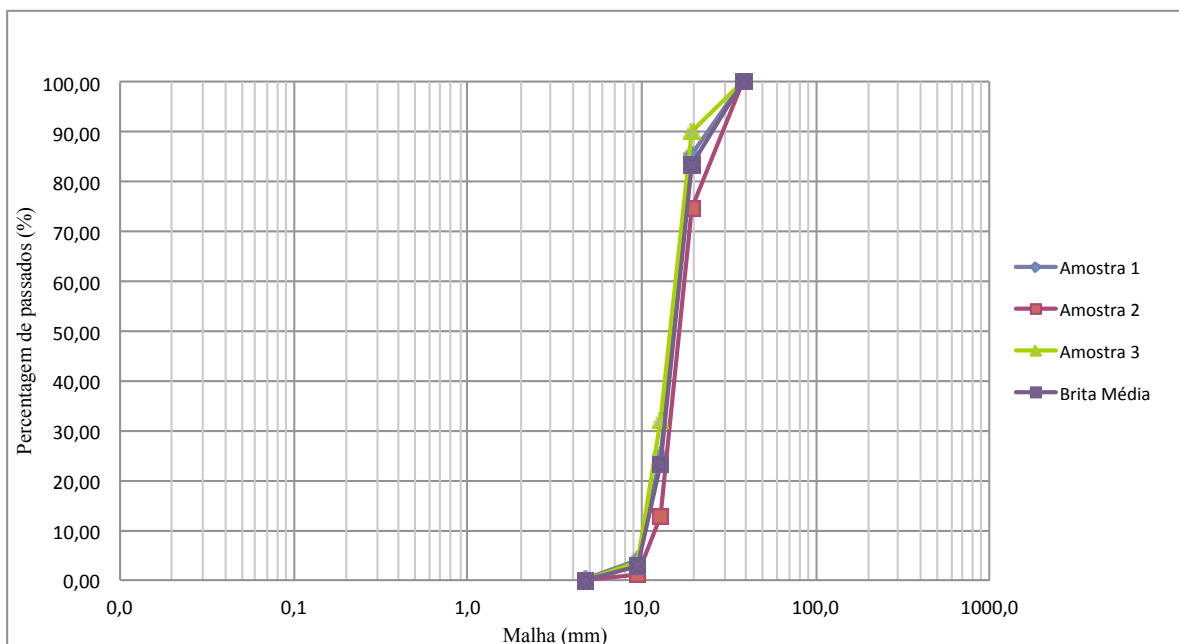


Figura 3.5 - Curvas granulométricas das três amostras de brita média e respectivo valor médio.

Tabela 3.16 – Resumo da granulometria da brita grossa (amostra 1).

Peneiro	Malha (mm)	Brita grossa 1			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
2"	50	0,00	0,00	100,00	0,00
1"1/2	38,1	245,00	4,90	95,10	4,90
1"	25,3	4451,90	89,02	6,08	93,92
3/4"	19,1	299,70	5,99	0,09	99,91
1/2"	12,7	0,00	0,00	0,09	99,91
3/8"	9,51	0,00	0,00	0,09	99,91
nº 4	4,76	0,00	0,00	0,09	99,91
nº 8	2,38	0,00	0,00	0,09	99,91
nº 16	1,19	0,00	0,00	0,09	99,91
nº 30	0,595	0,00	0,00	0,09	99,91
nº 50	0,297	0,40	0,01	0,08	99,92
nº 100	0,149	2,30	0,05	0,03	99,97
nº 200	0,075	1,60	0,03	0,00	100,00
Refugo	-	0,00	0,00	0,00	100,00
Totais		5000,90	100,00		
Módulo de finura:					8,04

Tabela 3.17 – Resumo da granulometria da brita grossa (amostra 2).

Peneiro	Malha (mm)	Brita grossa 2			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
2"	50	0,00	0,00	100,00	0,00
1"1/2	38,1	90,50	1,81	98,19	1,81
1"	25,3	4808,20	96,16	2,03	97,97
3/4"	19,1	91,40	1,83	0,20	99,80
1/2"	12,7	0,00	0,00	0,20	99,80
3/8"	9,51	0,00	0,00	0,20	99,80
nº 4	4,76	0,60	0,01	0,19	99,81
nº 8	2,38	0,00	0,00	0,19	99,81
nº 16	1,19	0,50	0,01	0,18	99,82
nº 30	0,595	0,90	0,02	0,16	99,84
nº 50	0,297	1,90	0,04	0,12	99,88
nº 100	0,149	4,10	0,08	0,04	99,96
nº 200	0,075	2,00	0,04	0,00	100,00
Refugo	-	0,00	0,00	0,00	100,00
Totais		5000,10	100,00		
Módulo de finura:					8,01

Tabela 3.18 – Resumo da granulometria da brita grossa (amostra 3).

Peneiro	Malha (mm)	Brita grossa 3			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
2"	50	0,00	0,00	100,00	0,00
1"1/2	38,1	201,40	4,03	95,97	4,03
1"	25,3	4520,10	90,39	5,59	94,41
3/4"	19,1	273,10	5,46	0,12	99,88
1/2"	12,7	0,00	0,00	0,12	99,88
3/8"	9,51	0,00	0,00	0,12	99,88
nº 4	4,76	0,00	0,00	0,12	99,88
nº 8	2,38	0,00	0,00	0,12	99,88
nº 16	1,19	0,00	0,00	0,12	99,88
nº 30	0,595	0,00	0,00	0,12	99,88
nº 50	0,297	0,20	0,00	0,12	99,88
nº 100	0,149	3,90	0,08	0,04	99,96
nº 200	0,075	2,10	0,04	0,00	100,00
Refugo	-	0,00	0,00	0,00	100,00
Totais		5000,80	100,00		
Módulo de finura:					8,03

Tabela 3.19 – Análise granulométrica da brita grossa (valores médios).

Peneiro	Malha (mm)	Brita grossa (média)			
		Resíduo		Acumulado (%)	
		g	%	Passado	Retido
2"	50	0,00	0,00	100,00	0,00
1"1/2	38,1	178,97	3,58	96,42	3,58
1"	25,3	4593,40	91,86	4,56	95,44
3/4"	19,1	221,40	4,43	0,14	99,86
1/2"	12,7	0,00	0,00	0,14	99,86
3/8"	9,51	0,00	0,00	0,14	99,86
nº 4	4,76	0,20	0,00	0,13	99,87
nº 8	2,38	0,00	0,00	0,13	99,87
nº 16	1,19	0,17	0,00	0,13	99,87
nº 30	0,595	0,30	0,01	0,12	99,88
nº 50	0,297	0,83	0,02	0,11	99,89
nº 100	0,149	3,43	0,07	0,04	99,96
nº 200	0,075	1,90	0,04	0,00	100,00
Refugo	-	0,00	0,00	0,00	100,00
Totais		5000,60	100,00		
Módulo de finura:					8,03

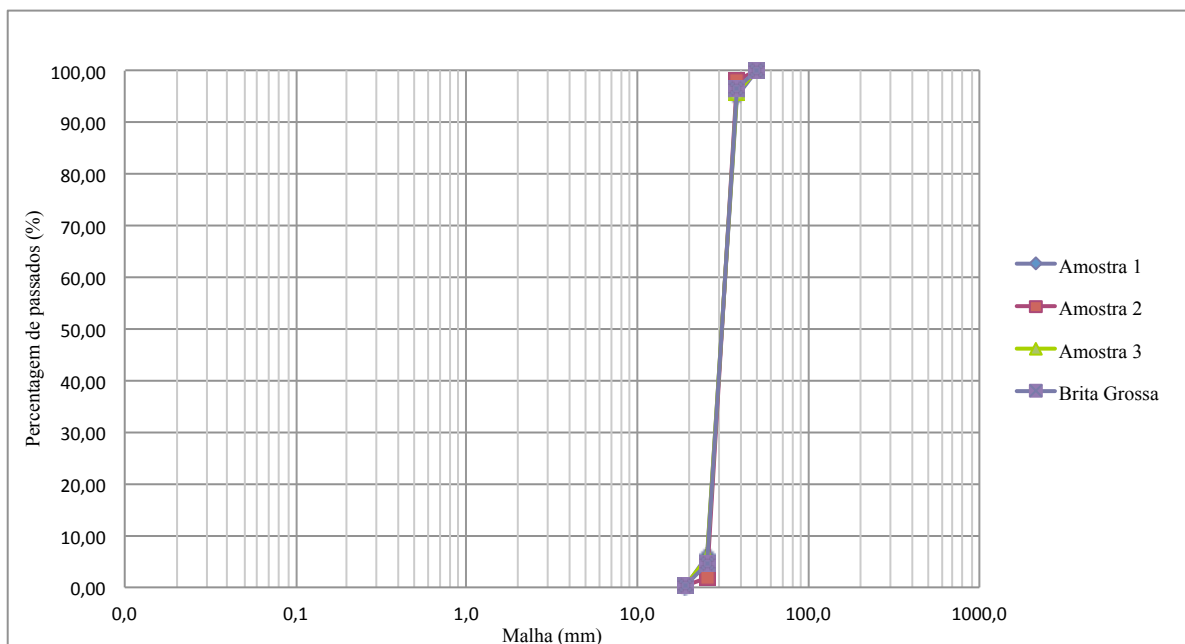


Figura 3.6 - Curvas granulométricas das três amostras de brita grossa e respectivo valor médio.

3.5.2 Baridade dos agregados

Entende-se por baridade (Ba) a relação entre a massa de um corpo (m) por unidade de volume (V), onde o V contempla todos os vazios (intra e interpartículas) em condições de temperatura, humidade e pressão determinadas (Pinho, F., 2006)

$$Ba = \frac{m}{V}$$

A preparação dos provetes previamente à obtenção de uma mistura de BCC, contemplou ainda a realização de ensaios laboratoriais para determinação da baridade (Ba) dos respectivos agregados, segundo a norma NP EN 1097-3; 2002. Os agregados foram previamente colocados separadamente em tabuleiros na estufa, à temperatura de 60°C, durante 24 horas. Retirados da estufa, pesou-se um recipiente e tarou-se a balança, esquartelando-se o material em quatro partes iguais, figura 3.7.



Figura 3.7 - Temperatura da estufa e esquartelamento.

De seguida foi colocado, com o auxílio de uma pá ou colher, dentro do recipiente em forma de cone invertido (no caso do filler e areia) de modo a que este material passasse para o balde receptor até ficar cheio, figura 3.8.

Nas britas não foi necessário a utilização daquele cone invertido, uma vez que as partículas do material não passavam pela boca mais estreita do referido cone.

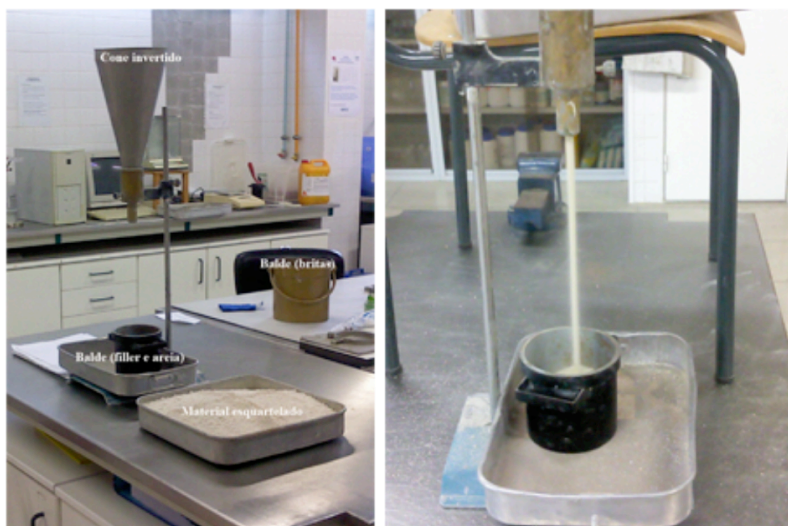


Figura 3.8 - Aspecto do dispositivo utilizado e enchimento do balde.

Após esta fase, retirou-se o excedente e com ajuda de uma régua metálica nivelou-se a superfície dos agregados. No caso das britas, este nivelamento foi mais complicado de efectuar, compensando-se o material nos espaços entre as partículas das britas, figura 3.9.



Figura 3.9 - Nivelamento do balde (areia); enchimento do balde (britas).

Por fim, é pesado na balança o conjunto (agregado + balde), resultando daí o peso do agregado, visto ter-se tarado o recipiente inicialmente.

O ensaio foi realizado individualmente e para um conjunto de três amostras de cada agregado, fez-se a média das massas.

Foram os seguintes, os valores médios obtidos para os diferentes agregados ensaiados:

- baridade do filler:

$$Ba(\text{filler}) = \frac{613,13}{750} = 0,81751 \text{ g/cm}^3 = 8,1751 \text{ kN/m}^3$$

- baridade da areia:

$$Ba(\text{areia}) = \frac{1096,97}{750} = 1,46263 \text{ g/cm}^3 = 14,6263 \text{ kN/m}^3$$

- baridade da brita fina:

$$Ba(\text{bf}) = \frac{4408,77}{3022} = 1,45889 \text{ g/cm}^3 = 14,5889 \text{ kN/m}^3$$

- baridade da brita média:

$$Ba(\text{bm}) = \frac{4504,17}{3022} = 1,49046 \text{ g/cm}^3 = 14,9046 \text{ kN/m}^3$$

- baridade da brita grossa:

$$Ba(\text{bg}) = \frac{4069,93}{3022} = 1,34677 \text{ g/cm}^3 = 13,4677 \text{ kN/m}^3$$

3.5.3 Mistura de agregados

Depois de todos os agregados terem sido submetidos ao processo de peneiração, e efectuadas as respectivas curvas granulométricas, elaborou-se a curva da mistura, que tem de estar compreendida no fuso granulométrico para BCC, tratando-se de um intervalo entre duas curvas, uma máxima e outra mínima, entre as quais a curva da mistura se deve encontrar. tabela 3.20, definido por Reeves (*in* ACI, 1999)

Tabela 3.20 - Fuso granulométrico para uma mistura de BCC (Santana, 2000).

Malha (mm)	Fuso Granulométrico	
	Min.	Máx.
0,075	10,0	16,0
0,177	10,0	20,0
0,420	12,0	25,0
2,000	20,0	49,0
4,760	26,0	65,0
9,520	38,0	80,0
19,100	56,0	91,0
25,400	66,0	93,0
38,100	85,0	97,0

Para a obtenção da curva final da mistura, o ajuste das percentagens foi efectuado através de várias tentativas de atribuição de percentagens aos diferentes agregados, para que a curva da mistura resultante melhor se enquadrasse entre as curvas granulométricas mínimas e máximas definidas pelos fusos da tabela 3.20. Desse ajuste resultaram as percentagens de agregados apresentadas na tabela 3.21.

Tabela 3.21 - Percentagem das classes de agregados na mistura.

Mistura (%)	Agregados				
	Filler	Areia 0,149/2,38	Brita fina 2,38/12,7	Brita média 9,51/25,4	Brita grossa 25,4/38,1
	15	20	25	20	20

Sintetiza-se na tabela 3.22, o ajuste das percentagens dos agregados que resultou na mistura final a utilizar para a realização dos provetes, e na figura 3.10, a respectiva curva granulométrica.

Tabela 3.22 - Granulometria dos agregados utilizados e da respectiva mistura de BCC.

Malha (mm)	Filler (%)	Areia (%)	Brita Fina (%)	Brita Média (%)	Brita Grossa (%)	Mistura (%)
50,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
38,100	100,00	100,00	100,00	100,00	96,42	99,14
25,300	100,00	100,00	100,00	100,00	4,56	77,09
19,100	100,00	100,00	100,00	83,53	0,00	72,87
12,700	100,00	100,00	97,24	23,40		60,78
9,510	100,00	100,00	75,18	2,96		51,61
4,760	100,00	99,97	7,69	0,00		34,84
2,380	100,00	99,11	0,00			32,84
1,190	100,00	89,62				31,13
0,595	100,00	55,01				24,90

Tabela 3.22 (Continuação) – Granulometria dos materiais utilizados e respectiva mistura.

Malha (mm)	Filler (%)	Areia (%)	Brita Fina (%)	Brita Média (%)	Brita Grossa (%)	Mistura (%)
0,297	100,00	16,59				17,99
0,160	100,00	4,70				15,85
0,128	98,96	0,00				14,84
0,125	98,70					14,81
0,100	95,00					14,25
0,096	94,08					14,11
0,091	92,81					13,92
0,090	92,47					13,87
0,080	89,17					13,38
0,064	82,14					12,32
0,063	81,63					12,24
0,050	74,38					11,16
0,045	71,41					10,71
0,040	68,44					10,27
0,032	63,92					9,59
0,032	63,66					9,55
0,025	60,45					9,07
0,024	60,00					9,00
0,020	58,22					8,73
0,016	56,31					8,45
0,015	55,82					8,37
0,013	54,51					8,18
0,013	53,96					8,09
0,010	51,19					7,68
0,009	49,03					7,35
0,008	47,51					7,13
0,006	42,42					6,36
0,006	41,22					6,18
0,005	36,45					5,47
0,004	30,01					4,50
0,004	28,50					4,28
0,003	22,94					3,44
0,003	21,51					3,23
0,003	16,45					2,47
0,002	11,02					1,65
0,002	6,69					1,00
0,002	5,65					0,85
0,001	5,11					0,77
0,001	3,27					0,49
0,001	1,34					0,20
0,001	1,07					0,16
0,001	0,46					0,07
0,001	0,11					0,02
0,001	0,00					0,00

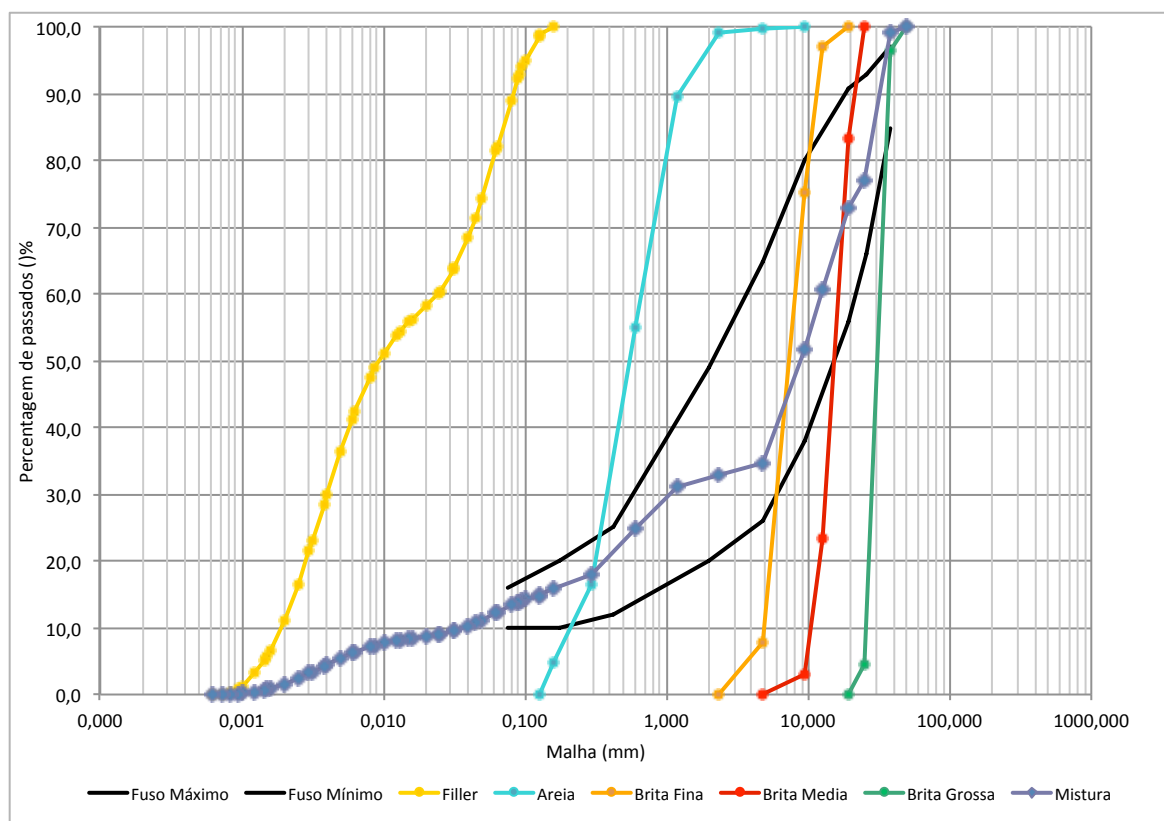


Figura 3.10 - Curvas granulométricas dos agregados originais e da mistura final.

3.5.4 Preparação de provetes

Seguiu-se a preparação dos provetes para ulteriormente caracterizar a resistência da mistura de BCC.

3.5.4.1. Mistura

Antes de se iniciar o processo de determinação do teor em água da mistura, os materiais a serem utilizados (filler, areia e as diferentes britas) foram previamente colocado na estufa durante 24 horas de modo a não apresentar humidade natural que dificultasse a determinação do teor em água final da mistura, enquanto que o cimento (Tipo IV/A 32,5R) foi colocado numa caixa para ser homogeneizado.

Decidiu-se fazer apenas uma amassadura (figura 3.11), em quantidade suficiente para efectuar cinco provetes com 6,360 kg cada, de modo a realizar a curva de compactação da mistura (tabela 3.21).



Figura 3.11 - Aspecto da mistura de agregados a seco.

3.5.4.2. Compactação dos provetes

Inicialmente construíram-se dois moldes de madeira de dimensões $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$, para simular, o mais possível, as condições de colocação do betão compactado em obra. A fim de estudar as condições óptimas de compactação para a mistura nestes moldes (teor em água óptimo e a baridade seca máxima), efectuaram-se em laboratório provetes teste recorrendo ao ensaio Proctor pesado.

a) Ensaio Proctor pesado

Trata-se de ensaios de compactação que utilizam um martelo vibrador (Kango), tabela I.1, I.2 e figura I.5, cujas características respeitam as normas seguidas - LNEC E 197-66 e E 262-72 (Anexo I). Este ensaio foi realizado no laboratório de materiais de construção do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Para determinar os teores em água das misturas a compactar nos cinco provetes de Proctor, foi necessário fazer uma amassadura com as quantidades de materiais expressas na tabela 3.23.

Tabela 3.23 – Quantidade total, em peso, de agregados utilizados no ensaio Proctor pesado.

Mistura (kg)	Filler	Agregados			
		Areia 0,149/2,38	Brita Fina 2,38/12,7	Brita Media 9,51/25,3	Brita Grossa 25,3/38,1
	4,5	6,0	7,5	6,0	6,0

Depois de bem misturados os agregados secos numa caixa, esta mistura foi esquartelada em cinco parcelas idênticas. Estas parcelas foram depois adicionadas, individualmente, às quantidades de água nas proporções indicadas na tabela 3.24, que foram amalgamadas novamente à mão até se obter uma amassadura homogênea.

Tabela 3.24 – Síntese dos materiais utilizados nos cinco provetes do ensaio Proctor pesado.

Mistura	Filler [kg]	Areia [kg]	Brita fina (kg)	Brita média [kg]	Brita grossa [kg]	Cimento IV [kg]	Água [ml]
A	0,90	1,20	1,50	1,20	1,20	0.36	150
B							200
C							250
D							300
E							350

Posteriormente, com o auxílio da colher, a mistura húmida foi colocada no molde de compactação (Proctor) em três camadas, compactando-as com o martelo vibratório, cerca de quinze segundos sobre cada camada, figura 3.12.



Figura 3.12 - Aspecto de uma das camadas no molde e do martelo vibratório a compactar.

Terminada esta compactação, o provete foi nivelado e o conjunto pesado, obtendo-se o peso húmido dos provetes, tabela 3.25.

Tabela 3.25– Peso húmido dos provetes juntamente com o molde.

	A	B	C	D	E
Peso provetes+ molde (kg)	9,563	9,695	9,735	9,830	9,807

Destes resultados obtém-se o peso húmido (Ph) de cada amostra por subtração do peso do molde (Pmolde) ao peso do conjunto amostra mais molde. Sendo a quantidade de água adicionada à mistura variável, pode-se calcular o teor em água para cada amassadura relativamente à dosagem de água utilizada. Assim, o cálculo do teor em água é dado pela razão entre o peso da água (Pw) e o peso total do material seco ($P_s = 6,360 \text{ kg}$), Anexo I.2.

Dos valores obtidos de teores em água (ω) e correspondentes pesos volúmicos secos das amassaduras (γ_s), tabela 3.26, é possível construir um gráfico, figura 3.13, donde se obtém os parâmetros óptimos de compactação - o teor em água óptimo ($\omega_{\text{opt.}}$) da mistura ensaiada é aproximadamente $\omega_{\text{opt}} = 4,6 \%$, e o respectivo peso volúmico seco máximo ($\gamma_{\text{máx.}}$) é de cerca de $21,97 \text{ kN/m}^3$.

Tabela 3.26 – Tabela resumo dos resultados obtidos após o ensaio de compactação.

Amostra	Amostra + Molde (kg)	Peso do molde (kg)	Peso húmido (kg)	Água (ml)	ω (%)	γ (Kg/m^3)	γ_s (Kg/m^3)
1	9,563	5	4,563	150	2,36	2183,3	2132,9
2	9,695		4,695	200	3,14	2246,4	2178,0
3	9,735		4,735	250	3,93	2265,6	2179,9
4	9,830		4,830	300	4,72	2311,0	2206,8
5	9,807		4,807	350	5,50	2300,0	2180,1

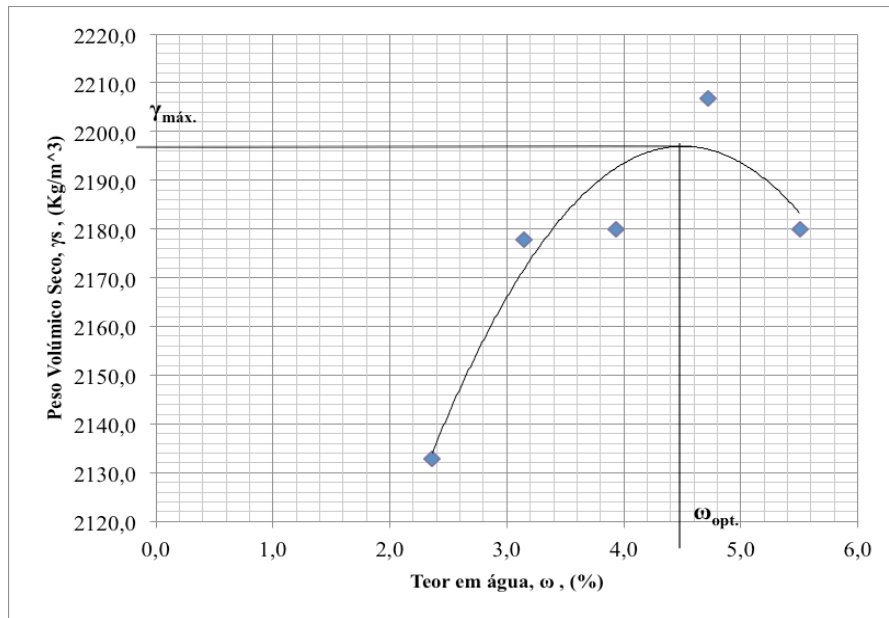


Figura 3.13 - Curva de compactação com determinação do teor em água ótimo.

Com base nestes valores, passou-se então a desenvolver a amassadura da mistura de BCC numa betoneira, tabela 3.27 e, ulteriormente, à obtenção dos provetes cúbicos preliminares de grandes dimensões.

Tabela 3.27 – Quantidade total de agregados e água na mistura final de BCC.

Mistura (kg)	Filler	Agregados				Cimento	Água (l)
		Areia 0,149/2,38	Brita Fina 2,38/12,7	Brita média 9,51/25,3	Brita grossa 25,3/38,1		
	65	90	110	90	90	25	20

b) Compactação provetes cúbicos preliminares

Os dois moldes de madeira foram cada um deles preenchido em duas fases: primeiro, encheu-se os 30 cm inferiores com a mistura e foram devidamente compactados. Posteriormente, acabaram-se de os preencher, um passado duas horas (2h) e, o outro, quatro horas (4h) após a compactação dos primeiros 30 cm, sendo esse procedimento efectuado da seguinte forma:

- Começou-se por fazer a pesagem e separação do material necessário para preencher os primeiros 30 cm de cada caixa;
- Após a pesagem o material foi colocado na betoneira (já em funcionamento), começando pela britas grossa, média e fina, de seguida a areia, o cimento, o filler durante cerca de 25 minutos para se conseguir uma mistura homogénea e por fim juntou-se a água;
- Depois de homogeneizada a mistura, foi colocado o material em três camadas de 10 cm, compactando-as uniformemente com o martelo vibratório Kango;
- Finda a compactação das três camadas, ou seja os dois “meio moldes”, esperou-se 2h para o bloco A e 4h para o bloco B. Terminado esse tempo de espera, procedeu-se ao enchimento do restante molde da mesma forma, descrito anteriormente, compactando o betão em três camadas de 10 cm cada;
- Por fim, finalizado o enchimento e devidamente compactado o BCC, as superfícies superiores dos moldes foram molhadas e cobertas com material desperdício.

O betão ficou em cura durante 28 dias, sendo este o tempo necessário para que ela ocorra.

No entanto, verificou-se que a compactação das camadas não foi efectuada da melhor forma, pois após a compactação da primeira camada a placa circular do martelo vibratório Kango partiu-se e, nem depois de soldado, se conseguiu compactar convenientemente. Assim, a restante compactação teve que ser efectuada manualmente, com a ajuda de uma placa de ferro de 15x15 cm, batendo uniformemente em toda a superfície das camadas, mas perdendo-se assim grande parte da energia de compactação que seria obtida com o martelo Kango.²

3.5.4.3. Provetes de BCC para ensaios mecânicos

Passados os 28 dias de cura da última camada dos provetes cúbicos preliminares, tentaram obter-se os provetes cilíndricos (diâmetro = 71 mm e altura = 80 mm) e cúbicos (150x150x150 mm³), figura 3.14, para serem submetidos a ensaios laboratoriais na máquina de Hoek (Anexo II) e na prensa de compressão uniaxial, respectivamente.

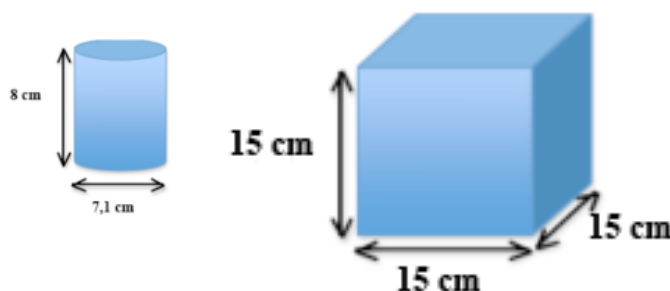


Figura 3.14 - Dimensões e formas dos provetes a ensaiar.

Contudo, registaram-se diversos precalços. Por um lado, naquela data a máquina de Hoek a utilizar não se encontrava disponível por necessitar de calibração. Acresce que se verificou também que a mistura não ficou convenientemente compactada, figura 3.15, tendo-se decidido então utilizá-la como um trabalho prévio, servindo de ensaio a ulteriores trabalhos

² A partir desta fase considerou-se que deveria ser realizada nova amassadura. Porém, tal mostrou-se difícil fazer devido ao tempo reduzido que restava para concluir o trabalho, optando-se então por um aprofundamento do conhecimento do estudo das barragens de BCC. Não obstante, todo o procedimento experimental é aqui apresentado visto ter sido muito útil na formação académica do mestrando.

desta índole. Assim, realizaram-se na mesma os provetes cúbicos e cilíndricos para avaliar os procedimentos.



Figura 3.15 – Aspecto dos provetes cúbicos preliminares das duas misturas.

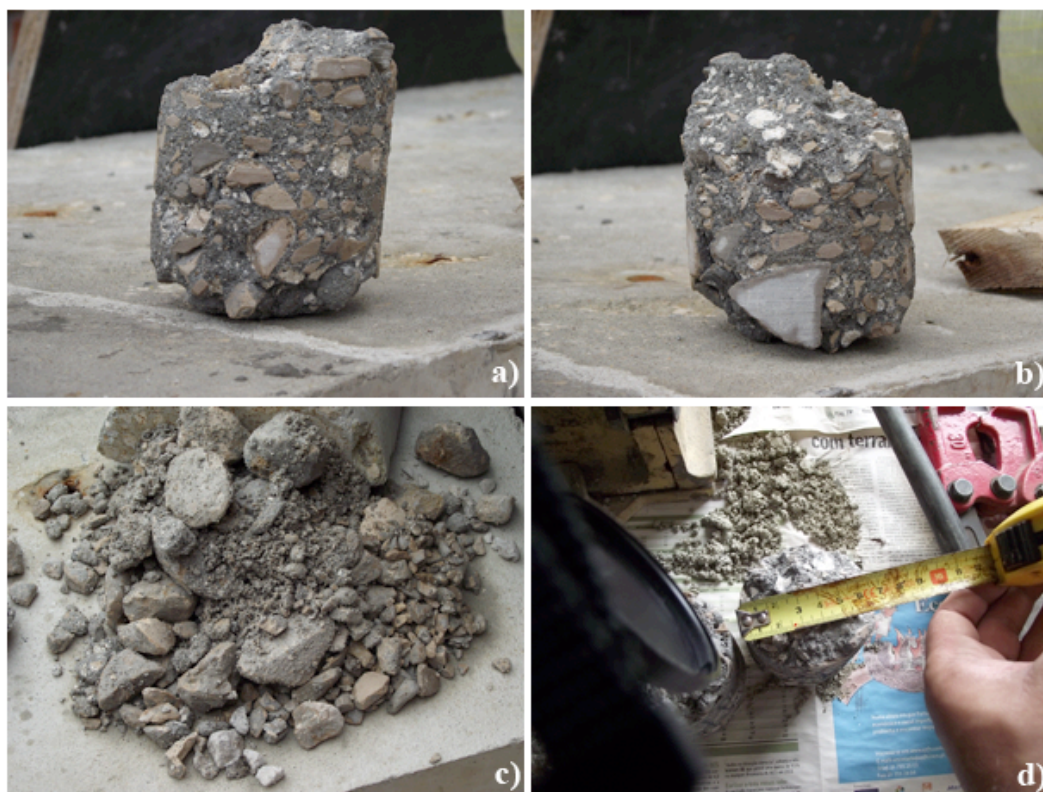
Começou-se por obter os provetes cilíndricos, ou seja, as carotes, com uma coroa diamantada de diâmetro interno de 79 mm. Os dois blocos A e B da figura 3.15, respectivamente com a última camada compactada ao fim de 2 h e 4 h, foram colocados sobre apoios de betão por forma a ser efectuado o seu caroteamento, figura 3.16.



Figura 3.16 – Obtenção de provetes cilíndricos com a caroteadora.

Posteriormente, tentou-se retirar os tarolos de dentro da caroteadora, o que se revelou difícil uma vez que o material deles se encontrava solto, nunca se tendo obtido uma carote de todo o comprimento do bloco inicial, figura 3.17.

O material retirado das carotes foi posteriormente seco e devidamente identificado, figura 3.18, para a eventualidade de se efectuarem ensaios de deslizamento de juntas na máquina de Hoek. Contudo, devido aos provetes obtidos dos tarolos não apresentarem as dimensões exigidas, em termos quer de diâmetro, quer de altura para que possam ser ensaiados naquela máquina (Anexo II), não foi possível efectuá-los no âmbito da presente dissertação.



a) e b) Carotes retiradas; c) Material solto dentro da carote; d) Diâmetro real da carote.

Figura 3.17 – Aspecto dos tarolos obtidos.



a) Identificação das carotes; b) Aspecto do bloco após carotagem

Figura 3.18 – Carotes retiradas.

Relativamente à realização dos provetes cúbicos de $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$, foi necessário o auxílio de uma serra eléctrica com disco diamantado por forma a poder-se cortar o remanescente dos provetes preliminares. Iniciou-se por um corte que separou cada bloco em duas partes iguais, figura 3.19.



a) Preparação da máquina de corte; b) Início do corte; c) Corte do bloco; d) Bloco cortado

Figura 3.19 – Aspectos do corte de um dos bloco prreliminares.

Posteriormente, esses blocos foram serrados noutros mais pequenos para que se pudesse obter os provetes cúbicos para ensaiar em compressão uniaxial, figura 3.20.



Figura 3.20 – Subdivisão de meio bloco em provetes cúbicos para a prensa de compressão uniaxial.

De referir que, durante a realização destes provetes menores, houve também algumas dificuldades. À semelhança do que aconteceu com o caroteamento anterior dos blocos, também aqui se verificou que o material no interior do bloco preliminar não estaria devidamente compactado, não existindo uma boa ligação entre o cimento e os agregados por forma a ter uma massa compacta. Assim, na realização dos pequenos provetes cúbicos, quando se iniciou o corte do meio bloco, este começou-se a esboroar, segregando-se as britas de maior dimensão do restante material e tornando difícil conseguir obter cubos sem imperfeições, figura 3.20. Deste modo, também não se conseguiram obter provetes para ensaiar à compressão uniaxial, como pretendido inicialmente.

Capítulo IV

Considerações finais

O betão compactado com cilindros (BCC) pode utilizar-se como alternativa ao betão convencional tanto no caso de barragens de gravidade como de arco, com vantagens demonstradas por diversas aplicações em todo o mundo. Contudo, o BCC apenas deve ser utilizado no corpo da barragem, visto requerer espaço livre para a sua colocação de forma a que as máquinas utilizadas consigam movimentar-se em condições tais que permitam a adequada compactação do betão.

No âmbito desta investigação, para a execução da mistura dos materiais utilizados no BCC recorreu-se, para além de cimento Portland tipo IV e de água, a agregados constituídos por britas, areias e fillers cujas dimensões foram definidas por um fuso granulométrico especificado pelo ACI.

Para se chegar à referida mistura foi realizado um extenso programa de análises granulométricas interessando conjuntos de três amostras dos diferentes tipos de agregados, a fim de se obter uma média para cada um. Com os resultados obtidos foi possível ajustar as percentagens dos diferentes materiais, de modo a que a curva final da mistura se enquadrasse no referido fuso granulométrico.

Seguiu-se o ensaio de compactação da mistura obtida, recorrendo ao martelo vibratório Kango do Departamento de Engenharia Civil (DEC), tendo-se determinado o teor em água óptimo (4,60%) e respectivo peso volúmico seco máximo ($21,97 \text{ kN/m}^3$), necessários para uma correcta compactação da mistura de betão a ensaiar.

No entanto não foi possível realizar uma adequada compactação da mistura de betão, uma vez que se verificou uma avaria do martelo vibratório, tendo a solução alternativa conseguida em tempo útil sido a obtenção de uma mistura artesanal, executada manualmente. Esta, revelou-se não ter sido suficientemente eficaz, originando uma mistura que, após secagem, apresentava muito fraca qualidade para dela se obterem, por corte, quer provetes cilíndricos, a ensaiar na máquina de Hoek, quer provetes cúbicos, para determinação da resistência à rotura em compressão uniaxial.

Para além disso, os ensaios de resistência ao corte previstos dificilmente seriam realizados nas condições adequadas uma vez que, para a preparação da mistura, foi utilizado um fuso granulométrico de dimensão máxima de 40 mm, que se concluiu ser demasiado grande tendo em vista o caroteamento de provetes cilíndricos cujo diâmetro não iria além dos 71 mm, a dimensão máxima admitida pela máquina de Hoek a utilizar.

Como continuidade da presente dissertação, propõe-se o desenvolvimento de um novo programa de estudos que permita reproduzir em laboratório provetes de BCC que possam ser ensaiados ao corte nas juntas (utilizando a máquina de Hoek) e à compressão uniaxial, cumprindo o previsto inicialmente. Para o efeito deve-se ter em consideração que o diâmetro máximo da brita a utilizar na máquina de Hoek deverá ser de 7 mm.

Para tal, sugere-se a segregação da brita inicialmente prevista, devendo-se rever a sua granulometria, utilizando um modelo reduzido da adequada que mantenha as proporções e o peso relativo das diferentes fracções.

Referências Bibliográficas

- [1]. ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE) – “*Roller Compacted Mass Concrete*”. (ACI 207.5R-80). ACI Materials Journal 1999;
- [2]. ALONSO, M.B.; BARGERTER, M.; MAJOREL, J.B.; CAVACINI, M. – “*Hormigón Compactado Con Rodillo de Uso Vial*”. Novembro, 2002;
- [3]. ANDRADE, W.P. – “*RCC Properties: what is more Important for Dams. 1º Brazilian International RCC Symposium*”. Ibracon, Brasil, Setembro 2008;
- [4]. ANDRIOLO, F.R. – “*Contribuições para o Conhecimento e Desenvolvimento do Concreto Rolado*”. São Paulo, 1989;
- [5]. ANTUNES, F.C. – “*Utilização de Modelação Física para Otimização da Estrutura Dissipadora de Energia de uma Pequena Central Hidrolétrica*”. Univerdade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2009;
- [6]. BATISTA, E.L, et al – “*Estudos Do Concreto Compactado Com Rolo Para A Face De Barragens – Ensaíos Executados In Situ*”. 44º. Congresso Brasileiro Do Concreto, Belo Horizonte- MG, 2002;
- [7]. CARVALHO, R. – “*Apontamentos das Aulas de Geologia de Engenharia para Barragens e Obras Subterrâneas*”, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Fevereiro-Julho, 2009;
- [8]. CASTRO, A.T.; RIBEIRO, A.B.; - “*Barragens de Betão Compactado com Cilindros*”. LNEC, 1996;
- [9]. CASTRO, A.T. – “*Barragens de Betão Compactado com Cilindros – Aspectos Estruturais*”. LNEC-DBB, 1996;
- [10]. COSTA, T; LANÇA, R – “*Apontamentos de Hidráulica Aplicada*”. Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Algarve. Fevereiro, 2001;
- [11]. CONTROLS – “*Rock shear box apparatus*”, Instruction manual. Novembro, 2001;
- [12]. COUTINHO, J.S., - “*Aulas Práticas de Materiais de Construção*”. FEUP, 2003;

- [13]. COUTINHO, A.S.; GONÇALVES, A. – “*Fabrico e Propriedades do Betão*”. LNEC. 1994;
- [14]. CHOI, Y.; GROOM, J.L. – “*RCC-Mix Design – Soils Approach*”. Journal of Materials in Civil Engineering. Janeiro/Fevereiro, 2001, pp. 71-76;
- [15]. FILHO, L. – “*O Uso do Concreto Compactado com Rolo em Barragens – Tendências Futuras*”. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Energia, Área de Concentração: Geração Hidrelétrica, pela Universidade Federal de Itajubá. Dezembro de 2003;
- [16]. INSTITUTO PORTUGUÊS DE QUALIDADE (IPQ) – Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. NP EN 197-1. Lisboa 2001;
- [17]. IPQ – Betão, Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. NP EN 206-1. Lisboa 2007;
- [18]. IPQ – Determinação da baridade e do volume de vazios. NP EN 1097-3. Lisboa 2002;
- [19]. IPQ – Inertes para argamassas e betões. NP-1379, Lisboa 1976;
- [20]. LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CÍVIL (LNEC) – Solo: Ensaio de compactação. E 197. Lisboa 1966;
- [21]. LNEC – Solo-cimento: Ensaio de compactação. E 262. Lisboa 1972;
- [22]. MARQUES, T. – “*Estudo de um Betão Compactado com Cilindros Aplicado a Barragens*”. Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia, pela FCT/UNL, Dezembro, 2008;
- [23]. NAGAYAMA, I.; JIKAN, S. *30 Years’ History of Roller-compacted Concrete Dams in Japan*. Proceedings of the fourth international symposium on roller compacted concreted concrete (RCC) Dams. Madrid, Novembro, 2003;
- [24]. NAGATAKI, S.; FUJISAWA, T.; KAWASAKI, H. – “*State of art RCD dams in Japan, 1º Brazilian International RCC Symposium*”. Ibracon, Brasil, Setembro 2008;
- [25]. ORTEGA, F. & GROSS, C. – “*Proceedings of the Internacional Conference on Roller Compacted Concrete Dam in the Middle East*”. Experience gained during construction of the first RCC dam in Bolivia. Abril 2002;

- [26]. ORTEGA, F – “*Proposta de Execução e Ensaios do Bloco Experimental*”, Barragem de Pedrógão – Fase de Construção, Agosto, 2003;
- [27]. ORTEGA, F – “*Procedimiento de ejecución del BCC em las Bacias de Dissipação*”, Barragem de Pedrógão – Fase de Construção, Novembro, 2003;
- [28]. ORTEGA, F.; BASTOS C.; ALVES, P – “*Roller Compacted Concrete Dams*”. Ed by L. Berga & S. Chonggang. 2003, pp 319 – 328;
- [29]. PINHO, F. – “*Apontamentos das Aulas de Materiais de Construção*”. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Setembro-Janeiro, 2006;
- [30]. QUARESMA, L.M.T. – “*Estudos Relativos a Pavimentos Semi-Rígidos – Dimensionamento e Observações*”. Tese apresentada a concurso para acesso à categoria de Investigador-Auxiliar e para a obtenção do grau de Especialista. LNEC, Janeiro 1992, pp. 51-61;
- [31]. RIBEIRO, A. B.; SANTANA, T.; GOMES, A. S. - “*Proceedings of the Internacional Conference on Roller Compacted Concrete Dam in the Middle East*”. The influence of consistency of RCC in the quality of the joints between layers. Abril 2002;
- [32]. SAGRADO, J. D. – “*Conferencia Brasil, 1º Brazilian International RCC Symposium*”. Ibracon, Brasil, Setembro 2008;
- [33]. SAGRADO, J. D. – “*Materiais, Dosagem e Técnicas de Controlo de Qualidade do CCR em Barragens Espanholas, 1º Brazilian International RCC Symposium*”. Ibracon, Brasil, Setembro 2008;
- [34]. SANTANA, M.T. – “*Metodologia Geotécnica de Composição de um Betão Compactado com Cilindros (BCC)*”. VII Congresso Nacional de Geotecnia. Porto. Abril 2000, pp 5561-572;
- [35]. TAMADA, K. – “*Dissipação de energia na Engenharia Hidráulica*”. Resumo de Aula da disciplina PHD 727. EPUSP 1994;
- [36]. THANG, N.Q.; HUNG, D.T.; KYAW, U.W.; CONRAD, M.; STEIGER, K.M. – “*Advantages of Roller Compacted Concrete (RCC) Gravity Dams – Two Examples in Southeast Asia*”. Agosto 2007;

- [37]. UNITED STATES SOCIETY ON DAMS – “*21st Century Dam Design – Advances and Adaptations*”. 31st Annual USSD Conference, San Diego(California). Abril, 2011, pp.245-283;
- [38]. US Army (US ARMY CORPS OF ENGINEERS) – “*Roller – Compacted Concrete*”. Agosto 2000;
- [39]. VALLEJO, L. G. (2002) – *Ingeniería Geológica*, Prentice Hall, Madrid;
- [40]. WENDLER, A. P. – “*Estudo Experimental do Concreto Compactado com Rolo Enriquecido com Calda de Cimento Para Face de Barragens de Concreto*”. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Construção Civil pelo Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010;

Referências Electrónicas

- [41]. AGRONOTÍCIAS – “*Alqueva : Construção da barragem do Pedrógão começa em Junho*”. Disponível em: <http://www.agroportal.pt/x/agronoticias/2002/0530d.htm>. Último acesso: Abril 2009;
- [42]. CHINA WATER - *Briefing of Jiangya Dam*. Disponível em: <http://www.chinawater.net.cn/icold2000/st-c3-01.htm>. Último Acesso em Julho 2011;
- [43]. ELECTRICIDADE DE PORTUGAL (EDP) – “*Novas Barragens*”. Disponível em: http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/index.php. Último acesso: Dezembro 2010;
- [44]. Ficha técnica do cimento disponibilizada pela SECIL: http://www.construlink.com/LogosCatalogos/secil_cimento_pozolanico_cemivav325r_ed2004_2009.pdf;
- [45]. INTERNATIONAL WATER POWER & DAM CONSTRUCTION. *More than a dam - the story behind Ralco (11 Agosto 2009)*. Disponível em: <http://www.waterpowermagazine.com/story.asp?sc=2053825>. Último acesso: 27/10/2009;

- [46]. LNEC – “*Estudo da ligação entre camadas em barragens de BCC*”. Disponível em: http://www.lnec.pt/organizacao/dm/nb/estudos_id/prj_ligacao_BCC. Último acesso: Abril 2009;
- [47]. OZALTIN – Al-Wehdah Dam – Jordan. Disponível em: http://www.ozaltin.com.tr/images/fotograf/buyuk/al_wehdah_karsidan.jpg. Último acesso: 18/11/2009;
- [48]. SEATTLE DAILY JOURNAL OF COMMERCE. *The Riddle of Ancient Roman Concrete* (3 Maio 2002). Disponível em: http://www.djc.com/news/co/11133038.html?query=OldConcrete_StillwaterDam&searchtype=all. Último acesso: 18/11/2009;
- [49]. TEMELSU International Engineering Services Inc. - *Revision of Final Design and Preparation of Detail Designs for Beydağ Dam (02/1994–07/2007)*. Disponível em: <http://www.temelsu.com.tr/english/images/baraj/73.jpg>. Último acesso: 18/11/2009;
- [50]. VALVERDE, F.M. *Sumário mineral brasileiro 2002: Agregados para a construção civil*. Brasília. Departamento Nacional de Produção Mineral, 2002. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/suma2002>. Último acesso: 15/04/2009;
- [51]. WEBSITE: <http://engenhariacivilonline.blogspot.com/2011/05/barragem-do-alto-lindoso.html>. Último acesso em: 10/18/2011;
- [52]. WIKIPÉDIA:http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/89/Odeleite_Paramento_montante.JPG. Último acesso em: Julho de 2011;

ANEXO I

Procedimento laboratorial

Apresentam-se, em seguida, detalhes dos procedimentos laboratoriais e equipamentos utilizados no desenrolar de dois ensaios laboratoriais executados nesta dissertação: análise granulométrica e ensaio de compactação Proctor pesado.

I.1 Granulometria

Este ensaio consiste na separação por peneiração do material por classes granulométricas de abertura decrescente (NP-1379, 1976). Esta análise granulométrica utiliza o seguinte procedimento:

- Secagem (na estufa a 60^a durante 24 horas) da amostra (para evitar a agregação das partículas de forma a não entupirem os peneiros, figura I.1;



Figura I.1 - Material a secar na estufa.

- Pesagem da amostra seca na balança digital;
- Selecção do material a analisar (esquartelamento);
- Sobreposição dos peneiros por ordem decrescente de abertura da malha;
- Peneiração dos materiais (areia e britas) nos peneiros da série principal, figura I.2;



Figura I.2 - Peneiração e agitador.

- Registo das massas que ficam em cada peneiro, sendo a sua soma igual à massa inicial da amostra, com tolerância de 1%, figura I.3;



Figura I.3 - Material retido nos peneiros e respectiva pesagem.

- Traçado da curva granulométrica (percentagem de material passado vs abertura da malha), figura I.4.

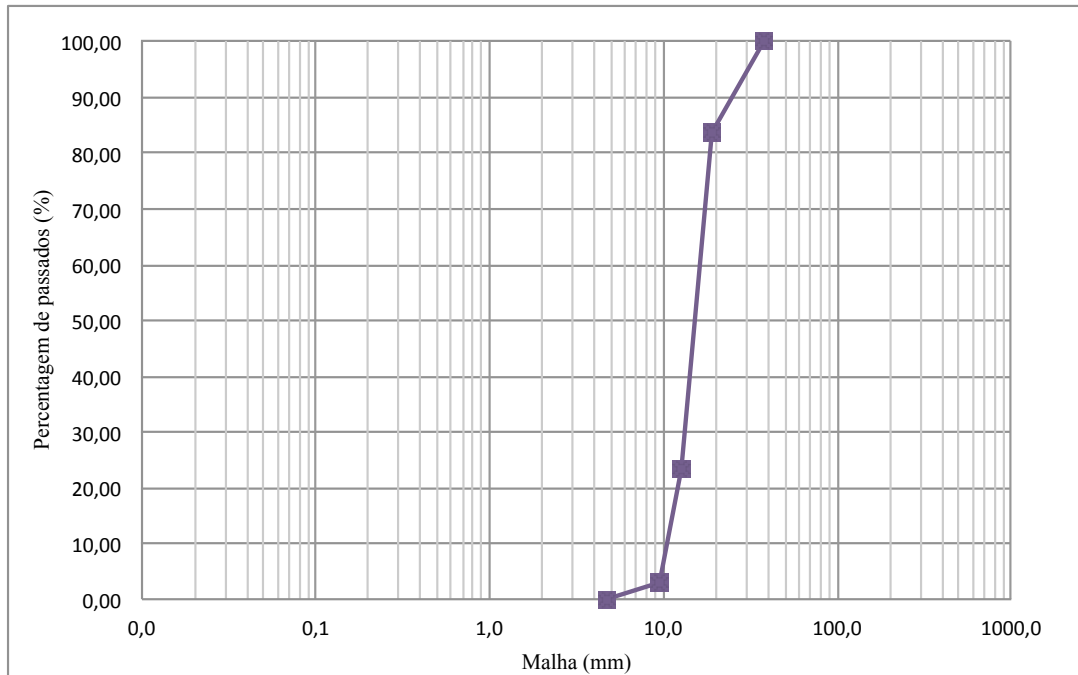


Figura I.4 - Curva granulométrica.

- Cálculo do Módulo de finura (Mf) – Dimensão média ponderada do peneiro do grupo no qual o material é retido, sendo os peneiros contados a partir do mais fino. Soma das percentagens retidas acumuladas em cada peneiro da série principal excluindo o peneiro #200, dividido por 100;

I.2 Proctor pesado

A técnica de compactação adoptada (LNEC E 197-66 e E 262-72) para a realização dos provetes foi a seguinte (Marques, 2008):

- Utilização de um martelo vibratório de frequência elevada, tabela I.1;
- Colocação de uma placa circular de 140 mm de diâmetro, e espessura de 10 mm, na extremidade do pé compactador;
- Provetes cilíndricos de 115 mm de altura e 152 mm de diâmetro (molde do ensaio Proctor pesado), tabela I.2;
- Compactação da mistura em três camadas durante, sensivelmente, 1 minuto por camada;

- Compactação dos provetes no menor tempo possível após a amassadura, por forma a que o betão não chegue a ganhar presa, perdendo assim as suas características de trabalhabilidade.

Tabela I.1 - Características do equipamento do ensaio de compactação com martelo vibratório (Marques, 2008).

Martelo vibratório – Kango	
Peso estático	750 N
Frequência de percussão	2500-2600 Percussões/minuto
Potência de vibração	750 W
Diâmetro da placa base	143 mm
Espessura mínima da placa base	10mm

Tabela I.2 – Características do molde do ensaio Proctor pesado.

Molde do Ensaio Proctor Pesado - LNEC E 197-66 e E 262-72	
Dimensões	Ø: 152 mm
	H: 115 mm
Volume	$2,09 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
Peso do molde	1,5 kg



Figura I.5 - Martelo vibratório Kango.

O teor em água (ω) de um provete de solo num ensaio Proctor é avaliado pela relação entre o peso da água que é adicionado ao peso de solo seco. No caso de misturas com cimento, esta relação pode não revelar a real quantidade de água existente na mistura, devido ao processo

de hidratação do cimento e ao consumo de água utilizado neste processo. Assim sendo, e para efeitos desta dissertação, o teor em água será dado pela relação entre o peso de água adicionada à mistura antes da compactação (P_w) e o peso seco da mistura de agregados juntamente com o cimento (P_s), dada pela expressão seguinte.

$$\omega = \frac{P_w}{P_s} \times 100$$

Em que: ω - teor em água (%);
 P_w – peso da água adicionado à mistura (N);
 P_s – peso seco da mistura (N).

Por outro lado, pode ainda calcular-se o peso específico seco das amassaduras (γ_s) sendo este função do peso húmido (γ) e do teor em água (ω). Os pesos volúnicos húmido e seco são obtidos de acordo com as seguintes expressões

$$\gamma = \frac{P_h}{V}$$

Em que: γ - Peso volúmico húmido da mistura (kg/m^3)
 P_h – Peso húmido total (kg)
 V – Volume do molde (m^3)

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V} = \frac{\frac{P_h}{1 + \omega}}{V} = \frac{\gamma}{1 + \omega}$$

Em que: γ - Peso volúmico húmido da mistura (kg/m^3)
 γ_s – Peso volúmico seco da mistura (kg/m^3)
 ω - Teor em água da mistura (%)
 P_h – Peso húmido da mistura (kg)
 P_s – Peso seco da mistura (kg)
 V – Volume do molde (m^3)

Anexo II

Funcionalidades da “Máquina” de Hoek

II.1 Enquadramento

Neste capítulo apresenta-se a máquina de corte de diaclases, também chamada “máquina de Hoek”, bem com os seus constituintes. Descrever-se-á o ensaio e as precauções a ter para a realização do mesmo. Por fim definem-se juntas de ligação com alguns aspectos relevantes aquando da colocação das varias camadas de betão, as quais serão objecto de estudo deste ensaio.

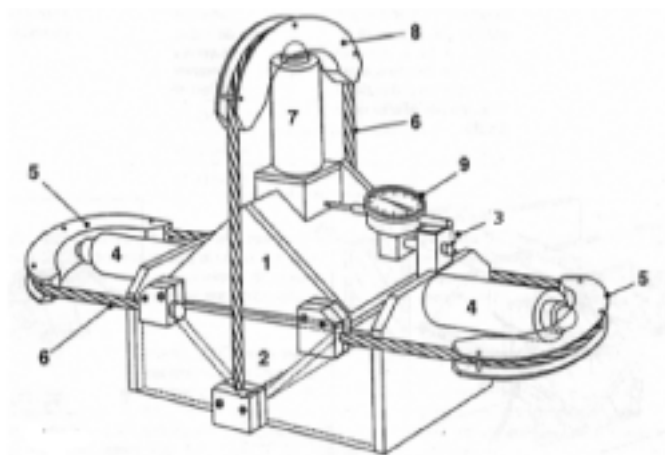
II.2 Maquina de Hoek

A máquina de Hoek, também denominada caixa de corte de diaclases, figura II.1, foi um dispositivo desenvolvido entre 1970 e 1980, pelo Laboratório de Mecânica das Rochas do Imperial College da Universidade de Londres. É um dispositivo projectado para a determinação de parâmetros mecânicos das amostras quer *in-situ* quer em laboratório. Este ensaio é efectuado sobre provetes prismáticos de dimensões 155 mm x 125 mm, ou provetes cilíndricos de área de base não superior a 9,582 m² (diâmetro \leq 102 mm), obtidos em tarolos de sondagem contendo juntas, diaclases ou outro tipo de descontinuidades.



Figura II.1 – “Máquina” de Hoek (Retirado do catálogo do equipamento).

Esta máquina de corte de diaclases consiste num par de meias caixas em aço (inferior e superior), onde serão colocadas e alinhadas, segundo um plano de corte, as amostras a serem ensaiadas. A amostra pode ser cortada em ambos os sentidos, aplicando o deslocamento horizontal da caixa de aço superior através de um par de macacos hidráulicos montados em ambos os lados da caixa inferior, figura II.2. A força resultante aplicada é transmitida pelos macacos à caixa de corte através de um par de garfos e de cabos de aço flexíveis, acoplados à caixa superior.



- 1 – Meia caixa superior
- 2 – Meia caixa inferior
- 3 – Suporte para deflectómetro
- 4 – Macaco hidráulico horizontal
- 5 – Garfo horizontal
- 6 – Cabo de aço flexível
- 7 – Macaco hidráulico vertical

Figura II.2 - Componentes da "máquina" de Hoek (Manual de instruções).

II.3 Constituintes da caixa de corte de diaclases

A caixa de corte de diaclases é dividida em duas secções: secção inferior (1) à qual estão fixos dois macacos hidráulicos responsáveis pela tensão de corte (2) e também o braço de apoio vertical (5); e secção superior (3) onde se fixa um terceiro macaco hidráulico responsável pela tensão normal (4), e dois braços de apoio horizontais (6), figura II.3.

As forças normal e de corte são exercidas por bombas hidráulicas manuais, e lidas em dois manómetros (8) acoplados a cada uma delas.

Associado à bomba hidráulica responsável pela tensão normal existe um sistema pneumático (regulador da pressão normal) (9) que mantém constante esta pressão durante o ensaio.

Na secção inferior da caixa de corte é montado um deflectómetro que permite medir os deslocamentos horizontais (7).

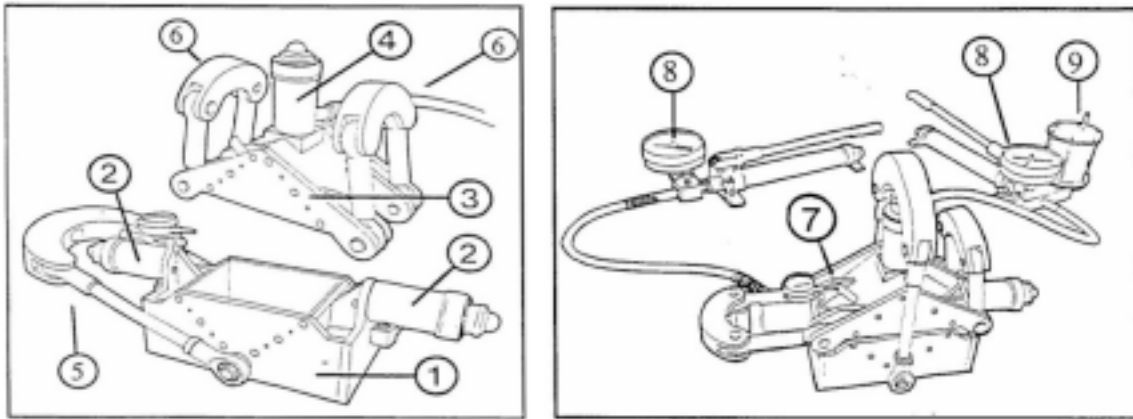


Figura II.3 - Componentes da "máquina" de corte (retirada do manual de instruções).

II.4 Descrição do ensaio

A eficiência deste ensaio está relacionada com a experiência adquirida ao longo da realização de vários ensaios que melhor se irá compreender o mecanismo regulador da pressão normal e o modo como se conjuga a pressão hidráulica e pneumática, figura II.4. A conjugação irá ditar a posição inicial da bóia do regulador.

A pressão hidráulica e pneumática são aplicadas alternadamente até o manómetro indicador da pressão normal atingir o valor desejado, e de modo que o bordo inferior da bóia do regulador permaneça aproximadamente a meia altura das janelas do regulador (posição mais eficaz). O bordo inferior da bóia nunca deve descer abaixo desta posição. Para se aliviar a pressão é preciso apenas abrir a válvula da bomba hidráulica.



Figura II.4 - Macaco hidráulico

II.5 Preparação dos provetes

Para a preparação dos provetes, o procedimento seguinte, é efectuado para provetes cilíndricos, uma vez que é preferível utilizar este tipo de amostras, contrariamente á utilização de provetes prismáticos, uma vez que as primeiras se adaptam melhor ajustadas nas duas meias caixas, superior e inferior.

Os provetes a utilizar devem respeitar os limites estabelecidos na tabela II.1:

Tabela II. 1 – Limites máximos e mínimos das dimensões dos provetes.

Secção Transversal Mínima	25 [cm ²]
Diâmetro Máximo	102 [mm]
Secção Transversal Máxima	125 x 115 [mm ²]
Altura Mínima	0,4 x L + 8 [mm]

L = comprimento da secção transversal ao longo do sentido de corte

Precauções a ter no ensaio

- Pressionar a bomba hidráulica com cuidado, evitando que a bóia do regulador seja comprimida contra o topo deste sem amortecimento;
- Aplicar a pressão de corte. O sistema assegura uma taxa de deslocamento razoavelmente uniforme;
- Ocasionalmente é necessário reajustar a pressão normal para manter o valor inicial;
- Registar a pressão normal e a resistência de pico indicadas pelos ponteiros auxiliares dos manómetros (ponteiros vermelhos);
- Prolongar o corte para além deste pico obtendo assim a resistência de corte residual;
- Se necessário inverter a direcção do corte registando outros valores de resistência residual;
- Os deslocamentos requeridos para a determinação da resistência de corte residual variam com o tipo de rocha, porém aceitam-se como suficientes deslocamentos na

ordem dos 10 mm. O deslocamento na deverá ultrapassar este valor de modo a não alterar em excesso a simetria da tensão normal;

- Repetir o processo para diferentes valores de pressão normal, registrando os respectivos valores de resistência de pico e residual;
- A partir das dimensões dos provetes e das pressões registadas, poder-se-ão elaborar gráficos Tensão normal (σ) vs Tensão de corte (τ) e comparar os diferentes valores de resistência de pico e residual;
- Para a obtenção de valores de coesão dever-se-á ter em conta a fricção do macaco hidráulico, assim como o peso da secção superior da caixa de corte.

